



Departamento de Térmica y Fluidos

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

PROPAGACIÓN DE ONDAS DE ULTRASONIDO EN UN MEDIO POROSO CON BURBUJAS GASEOSAS

Alumno: David Ruiz Serna

Tutores: Miguel Ángel Parrales Borrero

Pablo Peñas López

0. Índice de contenidos

0. Índice de contenidos

1. Introducción / motivación
2. Introducción teórica al proceso de difusión másica
3. Materiales y método
 1. Set up y análisis
 2. Proceso de obtención de datos
 - b.1. Proceso acústico
 - b.2. Proceso óptico
 3. Procedimiento experimental, tipos de experimentos
 - c.1. Calibraciones
 - c.2. Disolución parcial
 - c.3. Disolución total
4. Análisis de resultados
 1. Análisis referido a la transmisividad
 2. Análisis de imagen
5. Análisis frecuencial
 1. Descripción
 2. Medida de la atenuación
 3. relación con la fracción de vacío
6. Modelo teórico
7. Conclusión

2. INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN

Los yacimientos de petróleo y gas natural se encuentran localizados bajo la superficie terrestre, en el interior de trampas petrolíferas. La extracción de este petróleo se realiza directamente perforando el área en la cual queremos extraer. Previamente al proceso de extracción no conocemos variables como la presión en el interior de los poros en los cuales está confinado el crudo, así como la composición de gases disueltos que contiene este petróleo. Nos interesaría desarrollar un procedimiento de bajo coste que nos permitiese medir de manera no invasiva las propiedades de estos materiales porosos, lo cual nos podría ser de gran utilidad en aplicaciones geológicas y petroquímicas.

Esto se podría conseguir utilizando las características acústicas del gas atrapado en el interior de los poros. Mediante un salto positivo de presión, rompemos el equilibrio de concentración existente entre el gas disuelto en el líquido y la interfaz de la burbuja. La concentración en la interfaz de la burbuja disminuye con respecto a la del líquido, provocando que las burbujas se empiezan a disolver. El proceso de disolución se puede captar mediante la evolución de la transmisividad de un pulso acústico de alta frecuencia que recorre ese medio poroso. Esta evolución de la transmisividad a medida que las burbujas se disuelven está relacionada directamente con el ritmo de disolución de las burbujas, el cual a su vez depende de la presión existente en el interior del medio poroso. Además, estas evoluciones podrían contener también información con respecto a la composición de ese gas que se encuentra disuelto en el crudo.

Así pues, el objetivo de este trabajo es recrear unas condiciones similares a las que se podrían encontrar en la segunda parte del proceso indicado anteriormente, esto es, el proceso de disolución de estas burbujas que nuclean en el interior de un medio poroso. Así, podremos entender el proceso de difusión másica que se desarrolla al disolverse las burbujas en el fluido confinado en el medio poroso, además de relacionar la evolución de la transmisividad de este medio tanto con la presión hidrostática de los poros como con la fracción de vacío de las burbujas nucleadas en su interior. Por lo tanto, los objetivos que pretendemos alcanzar en la finalización de este trabajo son los siguientes:

1. Estudiar el comportamiento de crecimiento y disolución de burbujas en un medio poroso debido a incrementos en la presión. Para ello nos servimos de la utilización de un medio poroso que posibilita la nucleación de burbujas en su interior. El material que lo compone es un polímero denominado con las siglas ABS. Se trata de un material traslúcido, por lo que nos permitirá realizar un análisis óptico de todo el proceso de disolución de las burbujas que se lleva a cabo en el interior de los poros
2. Podremos relacionar mediante el análisis óptico la evolución del tamaño de las burbujas y por lo tanto de la fracción de vacío en los poros con las medidas acústicas (relacionadas con la transmisividad) registradas tras insonar un pulso a de altas frecuencias a través del medio poroso.

3. INTRODUCCIÓN TEÓRICA AL PROCESO DE DIFUSIÓN MÁSCA

Como ha sido mencionado previamente en la introducción, queremos hacer uso de las propiedades acústicas de las burbujas, en este caso disueltas en un medio fluido, para caracterizar propiedades como su presión o su composición en gases disueltos. En primer lugar, queremos ser capaces de caracterizar el proceso de difusión máscica que se producirá en el interior del medio poroso, lugar en el cual las burbujas se encuentran confinadas.

Para llevar a cabo este análisis, necesitamos partir del conocimiento teórico existente que nos permita analizar el comportamiento de estas burbujas. Todo comportamiento de cualquier fluido newtoniano está descrito por las ecuaciones de Navier – Stokes. Se trata de un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el comportamiento de cualquier medio fluido. Se obtienen aplicando los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica a un volumen fluido.

En el caso de nuestro problema en concreto, queremos conocer el comportamiento dinámico de las burbujas inmersas en un fluido, en este caso agua, para poder caracterizar tanto el proceso de difusión máscica que se produce en el interior de los poros, como el comportamiento acústico que tienen las mismas.

Este comportamiento físico de las burbujas ya ha sido analizado anteriormente, y es descrito por la ecuación de Rayleigh – Plesset:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = -\frac{1}{\rho_{\infty}}(p_a + p_{\infty}) + \frac{1}{\rho_{\infty}}\left[p_{g0}\left(\frac{R}{R_0}\right)^{-3\kappa} - \frac{2\sigma}{R} - 4\mu_E\frac{\dot{R}}{R}\right]$$

Esta ecuación en derivadas parciales describe el comportamiento de una burbuja de que se encuentra inmersa en un medio infinito. Sin embargo, en el caso de nuestro análisis, encontramos diferencias en cuanto a la aplicabilidad de esta ecuación para conocer el comportamiento dinámico de las burbujas.

Las burbujas que se encuentran en el interior del poro no están libres, sino que se encuentran confinadas entre sus fibras. Esto modifica el comportamiento de estas burbujas, en relación tanto con el proceso de difusión máscica que se desarrolla como para caracterizar el comportamiento acústico de las mismas.

Debido al confinamiento de estas burbujas en el interior del medio poroso, ésta condición modifica el proceso de difusión que se desarrolla en el interior de los poros. Si observamos una imagen capturada durante el proceso de difusión de estas burbujas, Podemos observar como la mayoría de las burbujas confinadas en el interior de los poros se encuentran ancladas a la superficie de los mismos. Esta condición de anclaje modifica completamente el comportamiento de las burbujas durante el proceso de disolución, la cual restringe el movimiento de la burbuja a lo largo del proceso, además de que reduce la superficie efectiva de contacto con el medio que se encuentra a su alrededor. Además, las zonas próximas a la pared, debido a su cercanía a ésta, encuentran un impedimento adicional durante el proceso de transferencia de masa que se desarrolla. La combinación de estos factores se traduce en una disminución del ritmo de disolución global de las burbujas.

Esta situación concreta no se tiene en cuenta a la hora de formular la ecuación de Rayleigh – Plesset, que solo explica el comportamiento de una burbuja inmersa en un fluido infinito, sin

contar además con la presencia de otras burbujas a su alrededor. Sin embargo, podemos servirnos de los procesos que describe para poder analizar el comportamiento de las burbujas durante los procesos de disolución.

Así, sirviéndonos de una simplificación de esta ecuación, podremos explicar de qué manera se desarrolla este proceso de disolución:

$$R^2 \approx R_o^2 - D_m k_H \bar{R} T \left(1 - \frac{C_\infty}{C_s} \right) t$$

Siendo para esta ecuación: D_m la difusividad másica, k_H la constante de Henry en base molar, \bar{R} la constante universal de los gases ideales, mientras que C_∞ y C_s son las concentraciones molares de aire en el líquido que se encuentra en el interior de los poros, así como la concentración de aire en la superficie de la burbuja, respectivamente. Aplicando la ley de Henry, podemos realizar las siguientes sustituciones en la fórmula anterior:

$$C_s = k_H \cdot P_d$$

La concentración molar de aire en la superficie de la burbuja se define como el producto de la constante de Henry, k_H , así como de la presión de la cámara para cada instante de tiempo, P_d .

Para el fluido que encuentra a una distancia suficientemente alejada de la superficie de las burbujas podemos escribir:

$$C_\infty = k_H \cdot P_a$$

Siendo P_a el valor de la presión atmosférica. Reescribiendo en cada caso para ambos en la ecuación simplificada, y ordenando los términos:

$$\Delta R^2 \approx -D_m k_H \bar{R} T \left(1 - \frac{P_a}{P_d} \right) t$$

De esta manera, podemos analizar cuáles con los factores que influyen en el proceso de difusión másica. Podemos observar que para la misma concentración en las burbujas, y en el fluido lo suficientemente alejado de éstas, el término $\left(1 - \frac{P_a}{P_d} \right)$ se hace nulo, no produciéndose así ningún cambio.

Sin embargo, una vez variamos el valor de la presión en la cámara P_d , observamos que el término $\left(1 - \frac{P_a}{P_d} \right)$ deja de ser nulo, produciéndose así el proceso de transferencia de masa del aire contenido en el interior de las burbujas hacia el fluido en contacto con ellas.

Para este proceso, podemos afirmar que la fuerza impulsora de la transferencia de masa será la diferencia de concentraciones entre la interfase de la burbuja C_s , y la concentración molar de aire en el fluido C_∞ . Podremos controlar el proceso de disolución cambiando la presión en el depósito, instante en el que variará la concentración de aire en la superficie de la burbuja, iniciándose así el proceso de difusión másica.

4. MATERIALES Y METODOS

4.1 SET UP EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de este experimento necesitaremos replicar un proceso similar al de nucleación y disolución de burbujas mencionado anteriormente. Además, queremos controlar en todo momento las condiciones en las cuales se desarrollan los procesos del experimento para poder reproducir distintas situaciones, y de esta manera conocer de qué manera influye cada cambio en el proceso. Por esto, queremos ser capaces de medir las distintas variables que influyen en el proceso, como son la variación de la presión, la cual controlaremos según nos interese, así como la variación de la onda acústica que viaja por el interior del medio poroso. Por último, queremos ser capaces de medir el tamaño de las burbujas en el interior de los poros, ya que conocer su evolución a lo largo de los distintos experimentos será clave para entender la evolución del proceso de disolución, y relacionarlo finalmente con la atenuación que producen las mismas. Para ello, nos servimos de la siguiente configuración de instrumentos, que nos permitirán medir todas las variables relevantes del problema con gran exactitud:

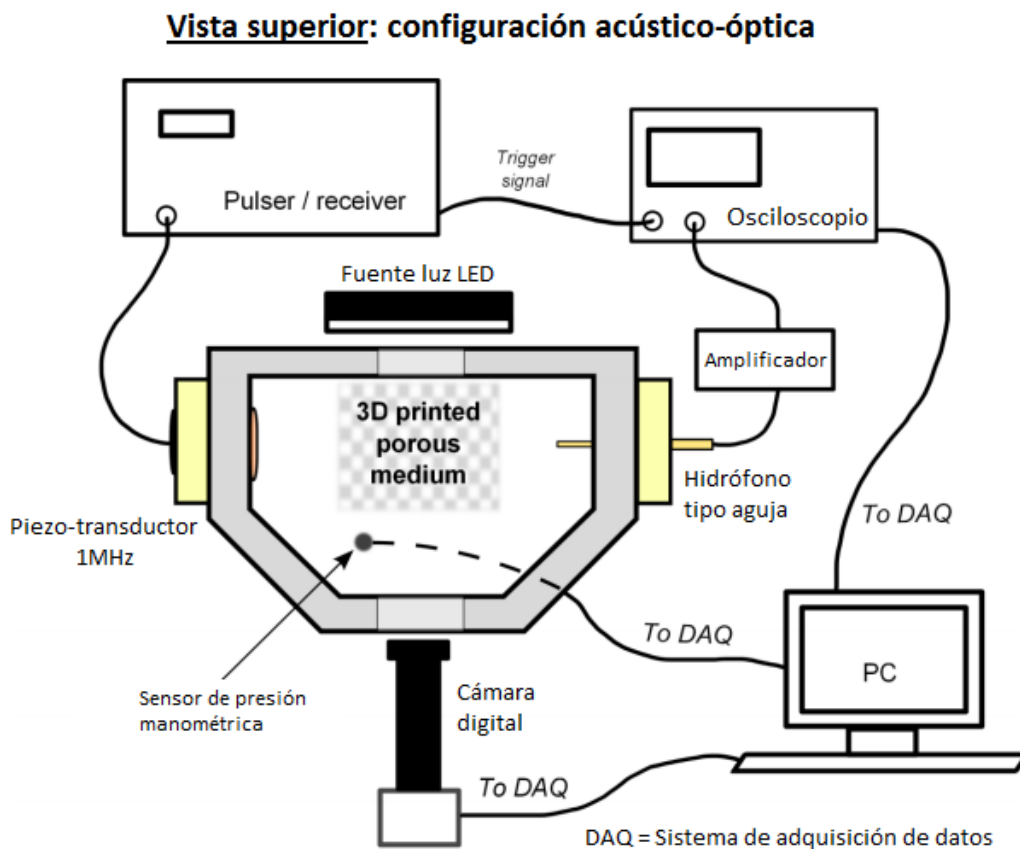


Figura 1: set up experimental, configuración acústico-óptica

En esta primera imagen, podemos visualizar la configuración acústico – óptica del experimento. Contamos con una cámara presurizada (centrada en la imagen), en la cual introduciremos los medios porosos que utilizaremos en los experimentos. Podemos observar en ella los elementos que utilizamos para llevar a cabo las mediciones de los distintos experimentos.

Contamos con un pulser, el cual configuramos para emitir una onda eléctrica que un transductor piezoeléctrico situado en un extremo de la cámara convertirá en onda acústica. Configuramos el pulser para que emita un pulso eléctrico con los siguientes parámetros de entrada:

- Repetition Rate = 40 Hz. El repetition rate indica la frecuencia con la que se envía la onda al transductor, que en este caso se envía 40 veces por segundo.
- Frecuencia central de la señal emitida: 0.5 MHz.

Posteriormente, esta onda eléctrica es llevada hacia el transductor, que se encuentra en un extremo de la cámara presurizada. Un transductor es un dispositivo con la capacidad de transformar un determinado tipo de energía en la entrada, en energía de otro tipo a la salida. En este caso contamos con un transductor del tipo electroacústico, dispositivo que nos permite transformar la electricidad en sonido y viceversa. Teóricamente, el modelo se basa en un transductor electromecánico (transforma energía eléctrica en mecánica) y en un transductor mecánico – acústico (transforma energía mecánica en acústica).

En el caso del transductor del experimento, contamos con un transductor electroacústico de tipo piezoeléctrico. Cuenta con un material cristalino en el cual sus iones están desplazados asimétricamente cuando el cristal se deforma. En el caso del experimento, el transductor recibe la señal eléctrica procedente del generador de funciones, la cual polariza el material piezoeléctrico y hace que se deforme, produciéndose así la señal acústica que posteriormente atravesará el medio poroso y será recogida por el hidrófono.

En el caso del hidrófono, sigue el mismo tipo de funcionamiento, pero a la inversa. Se trata de un transductor que transforma la señal acústica (emitida por el transductor conectado al generador de funciones) en señal eléctrica, que posteriormente se traslada al osciloscopio y a la tarjeta de adquisición para recopilar los datos. Consta del mismo funcionamiento y objetivo que un micrófono, pero diseñado específicamente para su uso en medios acuosos. Como podemos observar en la imagen y debido a su forma característica, se trata de un hidrófono de tipo aguja.

Después de ser captado por el hidrófono, este pulso eléctrico lo dirigimos a dos aparatos: por una parte al osciloscopio (previo paso por un amplificador), aparato mediante el cual podremos visualizar la onda a cada instante que es captada por el hidrófono, y por otra parte a una tarjeta de adquisición de datos conectada a un ordenador, la cual nos permitirá digitalizar la onda para poder ser posteriormente tratada mediante un software de análisis de datos.

En el osciloscopio configuraremos la señal recibida del pulser como una señal de tipo trigger o disparo, pudiendo así visualizar en qué momento la onda es enviada por el transductor, así como el instante en el que alcanza el hidrófono.

La cámara presurizada cuenta con una abertura transparente (como podemos observar en la figura 2) a través de la cual seremos capaces de captar, con ayuda de una cámara digital, todo el proceso de disolución de las burbujas. Esta cámara también se conectará a un ordenador para poder analizar las instantáneas captadas durante el proceso.

Vista frontal: sistema de presurización y llenado

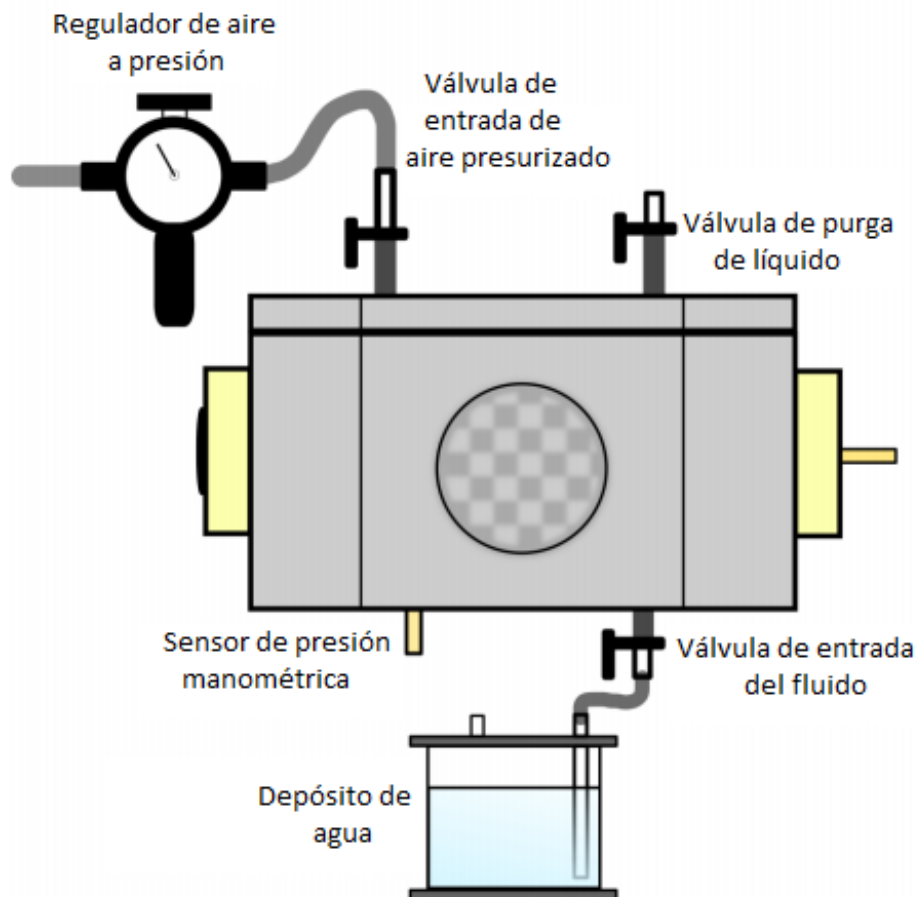


Figura 2: set up experimental, sistema de presurización y llenado

En este segundo esquema de los materiales utilizados, podemos observar qué elementos forman el sistema de presurización y llenado. Llenaremos la cámara de agua mediante un depósito que se conecta a ésta por su parte inferior, ayudándonos de la manguera de presión para inducir el movimiento del fluido en su interior. Contamos con un regulador de presión conectado a una de las válvulas instaladas en la cámara, el cual nos permitirá controlar los cambios de presión en el interior de la cámara de una manera sencilla. Estos cambios de presión serán captados por un sensor de presión manométrica instalado en su interior, el cual se encuentra, al igual que el hidrófono, conectado al sistema de adquisición de datos. Por último, podemos observar la configuración de las distintas válvulas instaladas en la cámara: una nos servirá para regular la entrada de la presión (superior izquierda), otra nos permitirá controlar la entrada del fluido en la cámara durante el proceso de llenado (parte inferior); y una última que abriremos durante el proceso de llenado para asegurarnos de que la cámara se

llena completamente de agua, sin quedar ninguna bolsa de aire en su interior (superior derecha)

- Medios porosos:

Tenemos el objetivo de conseguir un material con similar configuración a un medio poroso de origen natural (ejemplo), que nos permita llevar a cabo las distintas pruebas experimentales de nuestro estudio. Para ello, nos hemos servido de un programa de diseño por ordenador (CAD, Computer-Aided Design) para poder crear los medios porosos que necesitamos, permitiéndonos elegir la configuración de los poros según nuestras preferencias. En el caso de nuestro estudio hemos escogido tres tamaños de poro: 0.6 mm, 0.9 mm y 1.2 mm (explicación). Las dimensiones de nuestros medios porosos quedan definidas previamente por las dimensiones del interior de la cámara presurizada, teniendo la forma de cubos de aproximadamente 40 mm de lado.

Además del tamaño de los poros, necesitamos definir el material de construcción de los medios porosos, escogiendo las características que nos resulten de utilidad a la hora del desarrollo de este experimento. Hemos escogido dos polímeros que cumplen nuestros requisitos: ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y PLA (Poliácido Láctico).

Ambos materiales son translúcidos, lo cual nos aporta gran visibilidad para conocer en todo momento lo que sucede en el interior de los poros, permitiéndonos así recoger imágenes de los distintos experimentos que hemos llevado a cabo.

Además, podemos utilizar ambos como material de impresión en una impresora 3D, mediante modelado por deposición fundida (modelado FDM, "Fused Deposition Modeling"). El material se encuentra inicialmente en forma de filamentos, almacenados en rollos. Este filamento se hace pasar una boquilla, que se encuentra a una temperatura superior a la de fusión del elemento que forma los filamentos, permitiendo depositarlo según nuestras necesidades, esto es siguiendo el diseño previamente definido en nuestro CAD. Este método nos permite controlar de manera muy precisa el tamaño del poro y la estructura interna de estos medios porosos.

- Fluido introducido en la cámara presurizada

Para la realización del experimento, necesitamos un fluido mediante el cual podamos replicar algunas de las condiciones existentes en el medio subterráneo, en el cual podemos encontrar distintos fluidos que pueden contener gases disueltos. El proceso que nos interesa principalmente es el de nucleación de burbujas en el medio poroso, lo cual conseguimos satisfactoriamente con el uso tanto de agua procedente de la red de consumo como con agua carbonatada. Ambas, al estar saturadas de aire en el caso del agua de consumo, como de CO₂ en el caso del agua carbonatada, posibilitan que se produzca una nucleación de burbujas en el interior de la cámara presurizada, preferentemente en el interior del medio poroso. Podemos

visualizar la nucleación tanto del aire como del dióxido de carbono en el interior de un medio poroso:

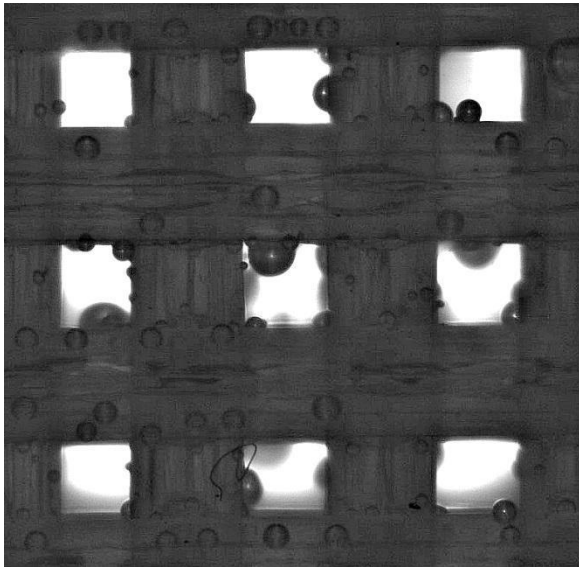


Figura 3: Burbujas de aire nucleadas en el interior de un medio poroso, ABS 1.2 mm

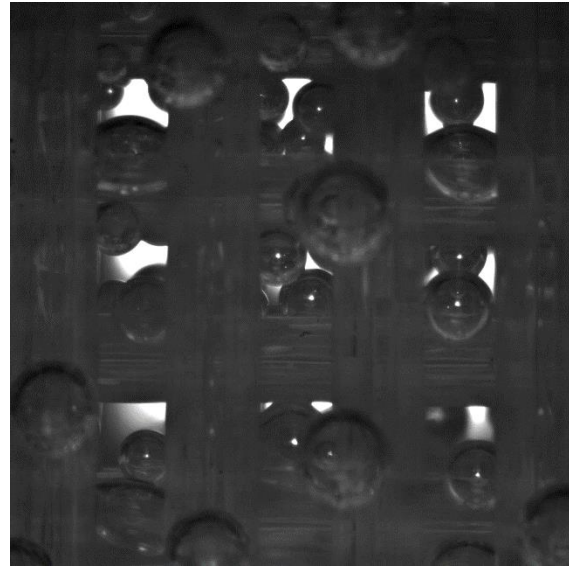


Figura 4: Burbujas de CO₂ nucleadas en el interior de un medio poroso, PLA 1.2 mm

El trabajar con agua en ambos casos proporciona evidentes ventajas:

- Se trata de un fluido comúnmente utilizado en multitud de aplicaciones.
- Podemos disponer de ella de una manera muy sencilla debido a su gran abundancia en la naturaleza.
- Conocemos con mucha exactitud sus propiedades y comportamiento, lo que nos facilita enormemente la realización de los experimentos, ya que la mayoría de los componentes utilizados se utilizan para aplicaciones relacionadas con la hidráulica.
- A la hora de captar imágenes, su transparencia nos ayuda a visualizar con todo tipo de detalle lo que sucede en el interior de la cámara presurizada.

- Labview

Para finalizar la configuración de nuestro sistema de adquisición de datos, debemos preparar un programa que nos permita tratar los datos provenientes de las distintas partes del sistema. En este caso hemos elegido un programa realizado con el software Labview, con un entorno completamente configurable, que nos permite recoger las distintas variables que capta nuestro sistema. En este caso, tendríamos dos programas según los datos que queramos recoger. Ambos recogen parámetros como la onda acústica recogida por el hidrófono después de atravesar la cámara, o la presión manométrica recogida por el sensor piezoeléctrico situado en el interior de la cámara. La diferencia fundamental entre ambos programas sería que uno de ellos nos permite recoger imágenes al conectar una cámara digital directamente al ordenador, mientras que el otro no dispone de esta capacidad, por lo que elegiremos un programa u otro según los datos que planeemos recopilar. La configuración que hemos escogido para recopilar la información mediante ambos programas es la siguiente:

- $AdFs = 10e8$

- Sampling points = 10000, puntos de la señal de la onda que queremos capturar.
- Tiempo de adquisición: varía según los datos que queramos recopilar. En el caso de no captar imágenes, hemos utilizado tiempos de adquisición desde los 100 milisegundos en el caso de experimentos en los que necesitemos una mayor precisión (explicar) hasta los 5000 o incluso 10000 milisegundos para los experimentos de disolución completa + exsolución, en los cuales, debido a que las condiciones varían lentamente a lo largo del tiempo, no sería necesaria la misma precisión que en experimentos en los que las condiciones cambian repentinamente, y por lo tanto recopilar los datos en intervalos de tiempo tan pequeños. Sin embargo, si queremos captar imágenes, nos encontramos con un inconveniente. Pudimos comprobar que al conectar la cámara al ordenador para recoger imágenes, para tiempos de adquisición menores a 500 milisegundos, el sistema no era capaz de captar todos los datos en el tiempo establecido, produciéndose cierto retraso en las medidas. En este caso, al no recoger las medidas en el intervalo de tiempo definido, el tiempo registrado por el programa de la adquisición de cada medida no se correspondería con el tiempo real del desarrollo del experimento, lo cual podría modificar el resultado de éste. Por ello, cuando decidimos captar imágenes definimos tiempos de adquisición de datos iguales o superiores a 500 milisegundos.

4.2 MÉTODOS (ACÚSTICO Y ÓPTICO)

Es de vital importancia la definición correcta de las distintas fases del procedimiento experimental, ya que la correcta obtención de los distintos datos necesarios

- **Proceso acústico**

En estos experimentos tenemos como objetivo final relacionar la presión en el interior de los poros con el ritmo de disolución de las burbujas nucleadas en su interior. Una manera de caracterizar el volumen de burbujas ocupando los poros sin recurrir a métodos visuales (problema real que encontramos al medir la presión de un medio poroso localizado en el subsuelo) consiste en medir la transmisividad de una onda acústica atravesando el medio poroso. Caracterizando la evolución de esta transmisividad a lo largo de distintos experimentos podemos relacionarla con la composición de los gases atrapados y con la fracción de vacío presente en los poros.

Para determinar qué es el sonido, lo definiríamos como cualquier fenómeno que involucre la propagación en forma de ondas elásticas. Cualquier onda generada necesita para propagarse la presencia de un medio que sea capaz de transmitir esta perturbación. Es el propio medio el cual, con su compresión y expansión, es capaz de producir la propagación de estas ondas. Esta propiedad de los medios se denomina elasticidad, característica imprescindible para que en un medio sea capaz de transmitirse una onda acústica. Esta propagación se define como un fenómeno en el cual se transporta energía, pero no materia, en forma de ondas mecánicas que se propagan a través de un medio necesariamente elástico, por lo que este transporte no se podría producir en el vacío. La energía propagada por el emisor en forma de ondas mecánicas se traduce en pequeñas variaciones rápidas de presión alrededor de la presión atmosférica. Esta variación instantánea de presión con respecto a la atmosférica es denominada presión acústica.

Estas ondas sonoras se producen cuando un cuerpo vibra u oscila rápidamente, caracterizando esa vibración mediante un parámetro denominado frecuencia, que representa el número de vibraciones u oscilaciones que efectúa un cuerpo en un intervalo de un segundo, expresado en hercios o hertz (representados como Hz, ciclos por segundo). Normalmente asociamos este fenómeno de propagación con el sonido que podemos percibir mediante nuestro aparato auditivo. Los sonidos que se propagan son denominados audibles si su frecuencia de oscilación está comprendida entre 20 y 20000 Hz. En el caso de la onda producida por el transductor de nuestro experimento, ha sido configurada como una onda con una frecuencia central de 0.5 MHz, valor que se encuentra caracterizado dentro de la categoría de los ultrasonidos, caracterizados por tener una frecuencia por encima del umbral de audición del ser humano.

Cuando esta onda producida por el transductor no encuentra ningún obstáculo en su avance, no interactúa con ningún elemento a su paso por la cámara, por lo que al llegar al extremo donde se encuentra el hidrófono llega a éste sin prácticamente haberse atenuado. Sin embargo, con la presencia tanto del medio poroso, como de las burbujas que se encuentran nucleadas en su interior, al avanzar por la cámara interactuaría con todos estos elementos, los cuales, en función de su tamaño y composición, atenuarán la onda acústica de una manera u otra.

Podemos visualizar la evolución de una onda al comienzo de un experimento (es decir, cuando un volumen de burbujas determinado se encuentra nucleado en el interior del medio poroso,

atenuando la onda acústica producida por el transductor), con una onda transcurrido un periodo determinado de tiempo una vez se ha introducido un golpe de presión:

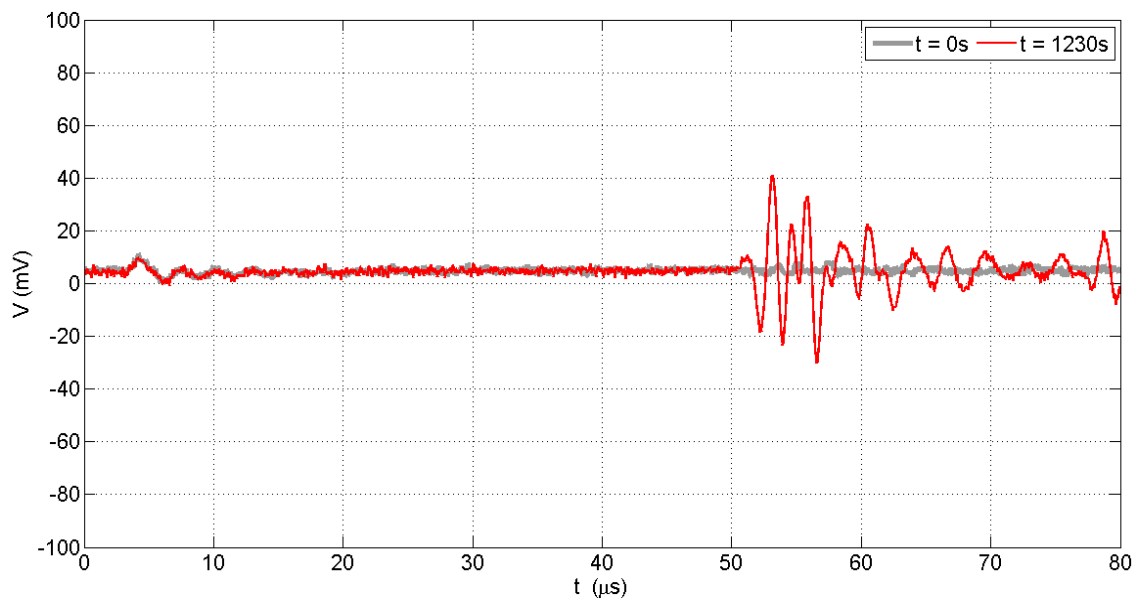


Figura 5: Comparación de dos instantes para una disolución completa. Medio poroso: ABS 0.9 mm

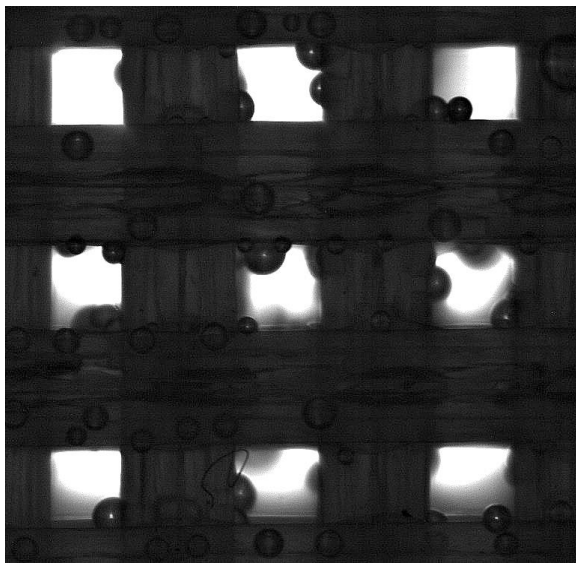


Figura 6: Disolución completa para ABS 0.9 mm, $t = 0 s$

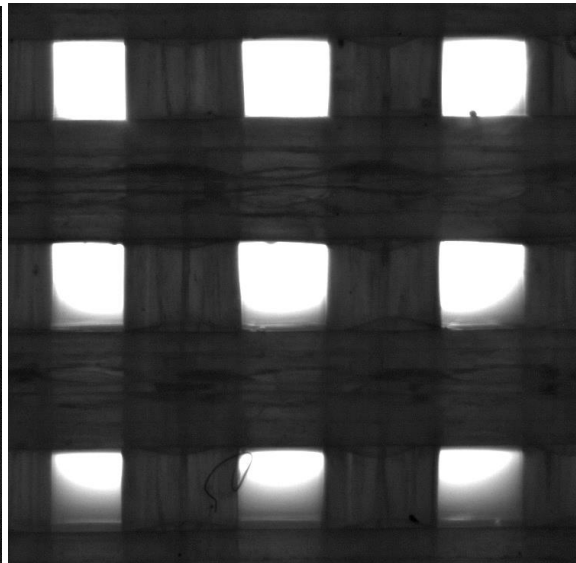


Figura 7: Disolución completa para ABS 0.9 mm, $t = 1230 s$

Podemos comprobar cómo a medida que transcurre el tiempo se produce la disolución de las burbujas en el interior del poro, por lo que hay zonas de la onda captada por el hidrófono que aumentan su amplitud significativamente. La escala de tiempos indicada en la parte inferior de la gráfica corresponde a la recepción a lo largo del tiempo de la onda acústica por parte del hidrófono, escalada en milisegundos, correspondiente orden de magnitud del tiempo que tarda una onda acústica en propagarse en un medio líquido como es el agua, a una velocidad aproximada de unos 1500 metros por segundo.

El punto $t = 0$ s indicaría el disparo de la onda acústica por parte del transductor, mientras que en tiempos en torno a los 50 microsegundos es cuando el hidrófono capta la mayor amplitud de la onda, que se corresponde con la llegada de ésta directamente al cabezal del hidrófono. Antes de los 50 microsegundos podemos observar que no capta ninguna amplitud significativa, excepto en puntos en torno a los 5 microsegundos, donde se puede apreciar que capta una señal de ligera amplitud. Esta parte, sin embargo, no la tendremos en cuenta en el resultado de los experimentos, ya que se trata de ruido procedente del acople con el transductor, por lo que no resulta relevante para nuestros resultados. Por otra parte, las variaciones en la amplitud que observamos después de ese pico tampoco resultan de gran utilidad para el análisis que vamos a realizar, ya que lo más importante resulta ser la onda que obtenemos directamente del transductor, la que es modificada lo menos posible tanto por la presencia del medio poroso como por la presencia de las burbujas en su avance. Por ello, la medición que realizamos de la transmisividad del conjunto medio poroso – burbujas se corresponde con la medida del voltaje pico a pico máximo de la onda captada por el hidrófono:

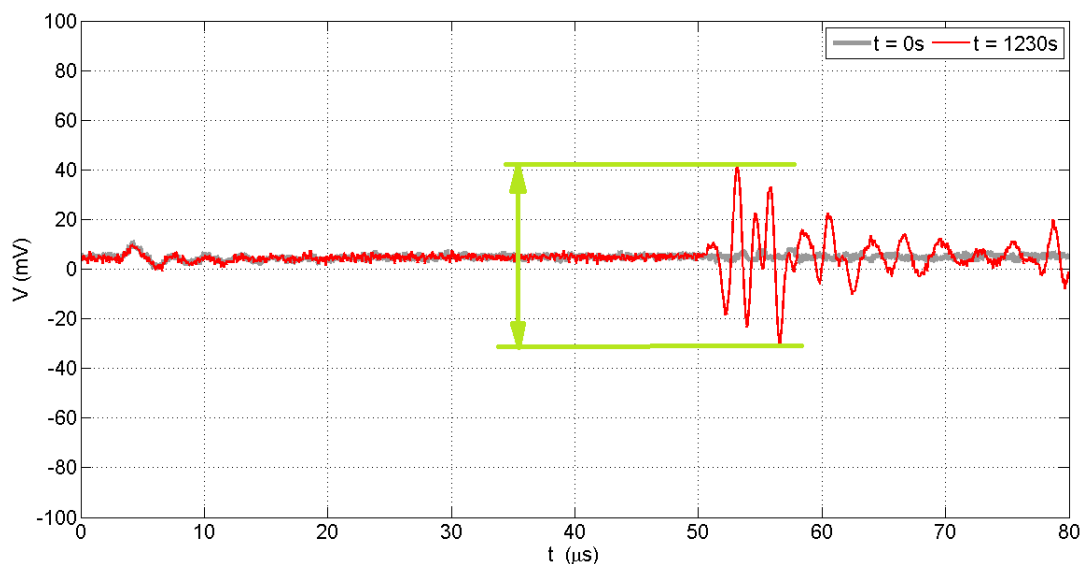


Figura 8: Medida de la transmisividad del conjunto medio poroso – burbujas

La medida de este voltaje pico a pico máximo se corresponderá de ahora en adelante con la medida equivalente a la transmisividad del conjunto matriz porosa – burbujas.

Como podemos observar en las imágenes de los poros en la parte superior, la onda más atenuada (en color gris, casi impercible), se corresponde con la situación en la cual hay una gran cantidad de burbujas en el interior de los poros que consiguen atenuar la onda. Sin embargo, una vez se han disuelto (onda acústica menos atenuada, color rojo) comprobamos que la amplitud de la onda captada por el hidrófono es considerablemente mayor, consecuente con la desaparición de las burbujas en el interior de los poros, y la menor atenuación final de la onda acústica captada, producida únicamente por la presencia del medio poroso.

Podríamos comparar de qué manera influyen tanto la presencia del medio poroso como la presencia de las burbujas en el avance de la onda acústica por el interior de la cámara presurizada. Obteniendo la onda acústica captada por el hidrófono para estos tres casos obtendríamos los siguientes resultados:

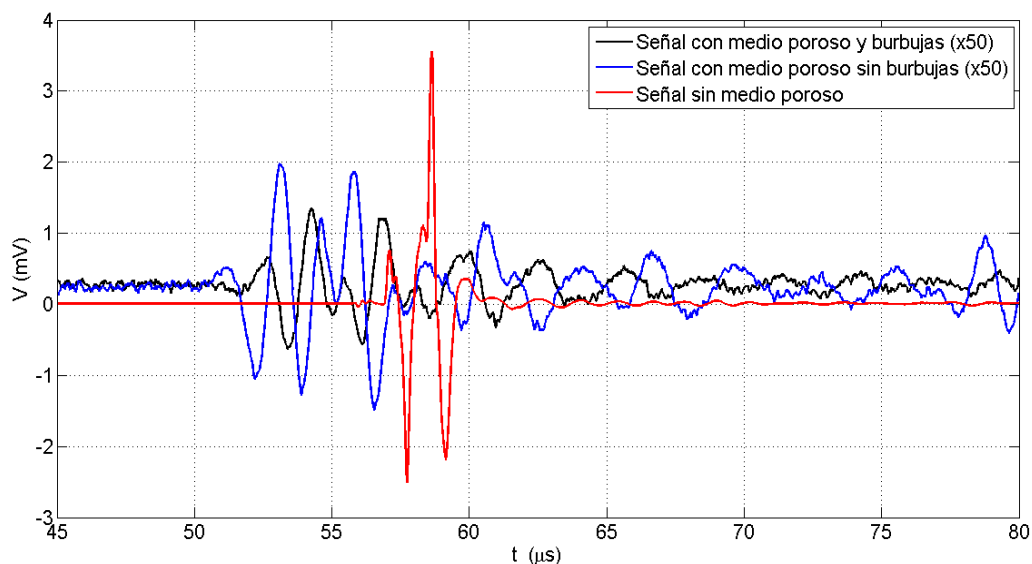


Figura 9: Comparación de señal original y señales con medios porosos

En esta figura se encuentran representadas la onda acústica cuando no se encuentra el medio poroso ni burbujas a su paso (en color rojo); esa misma onda cuando sólo encuentra el medio poroso en su avance, esto es, sin burbujas en su interior (en color azul); así como esa misma onda cuando se encuentra tanto con el medio poroso, como con burbujas nucleadas en su interior (color negro). Podemos observar que tanto la onda recogida después de su paso por el medio poroso sin presencia de burbujas, como la del conjunto matriz porosa – burbujas, se encuentran multiplicadas por un factor 50 para poder ser vistas y comparadas con la señal acústica recogida sin presencia del medio poroso. Esto nos da una idea de la gran atenuación que provocan tanto la presencia del medio poroso como la presencia de las burbujas nucleadas en su interior.

- **Proceso óptico**

Una vez analizado el proceso de captación de las ondas acústicas, podemos completar el análisis de los experimentos con un estudio de las imágenes captadas utilizando una cámara digital mientras se llevan a cabo. Como hemos podido observar, la presencia de burbujas nucleadas en el interior del medio poroso tiene una gran influencia en el valor de la transmisividad que es captado por el hidrófono. Recopilando estas imágenes, podremos medir la evolución del tamaño de las burbujas nucleadas en los poros, para más tarde relacionarla con el resto de las variables del problema. Analizando para las imágenes mostradas anteriormente la disposición de las burbujas a lo largo de un experimento podemos determinar cuál será la mejor manera de realizar estas mediciones.

Como podemos comprobar en las imágenes, la mayoría de las burbujas nucleadas en el interior de los poros se encuentran ancladas a sus paredes, por lo que no se tratan de burbujas completamente esféricas, sino que constan de una superficie plana en contacto con la superficie de los poros. Como hemos observado en la introducción teórica, nos interesa conocer la evolución del volumen de las burbujas para relacionarlo tanto con los procesos de difusión másica (Epstein-Plesset) como más adelante para caracterizar la atenuación de la onda acústica producida por estas burbujas. En este análisis nos hemos servido del conocido software Matlab, en el cual hemos creado un programa mediante el cual podemos recoger todas las imágenes obtenidas y realizar las mediciones correspondientes relativas a las

burbujas en el interior de los poros. Debemos decidir cuál será la mejor manera de medir estas burbujas para que sea lo más representativa posible de cara a los resultados que vamos a obtener. El programa desarrollado en Matlab se basa en una elección manual de los puntos a partir de los cuales se realizarán las medidas, lo que implica que cuantos más puntos tengamos que escoger para hacer cada medida, resultará en un mayor error de las mismas, factor que habrá que tener en cuenta a la hora de escoger un método. En este caso, y teniendo en común que ambos suponen la elección manual de los puntos de medición, hemos definido 2 métodos distintos de medición para las burbujas:

1. Medición de longitud característica:

Resulta ser el método más sencillo de llevar a cabo. La longitud característica de la burbuja, en el caso de verse completamente, la hemos definido como el diámetro de la misma. Sin embargo, en el caso de ver únicamente una fracción de la misma, escogeremos la misma longitud característica para todas las burbujas que queramos medir. Este tipo de medida es más adecuada para los casos en los cuales no veríamos la burbuja a medir al completo (ya que no sabemos si realmente están ancladas al medio poroso, o sólo ocultas por su presencia). En el caso de nuestro programa, tendríamos que escoger dos puntos: uno de ellos se encuentra en el punto central de contacto de la burbuja con la superficie del poro, y se mantendría fijo a lo largo de todas las mediciones, mientras que el otro punto se correspondería con el punto en la superficie de la burbuja que se obtiene al hacer pasar una perpendicular a la superficie del poro por el punto elegido en primer lugar (observar imagen inferior). Hay que tener en cuenta que el punto escogido en la superficie varía a lo largo de las distintas imágenes capturadas de un experimento, ya que el tamaño de la burbuja irá cambiando a lo largo del mismo. Además, este método nos permite medir las pequeñas variaciones en el volumen con más exactitud, al estar uno de los puntos completamente anclado, por lo que solamente tenemos que escoger un punto de medida a lo largo de las distintas capturas, consiguiendo así un menor error en las mediciones. Mostrando el método que se ha llevado a cabo para realizar las mediciones:

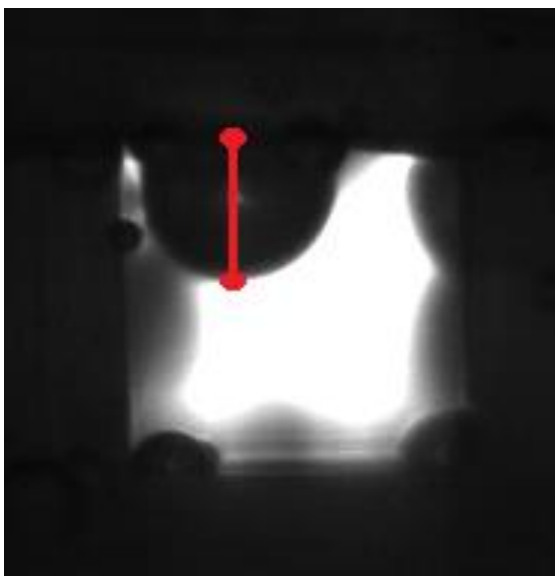


Figura 10: Medida de la longitud característica

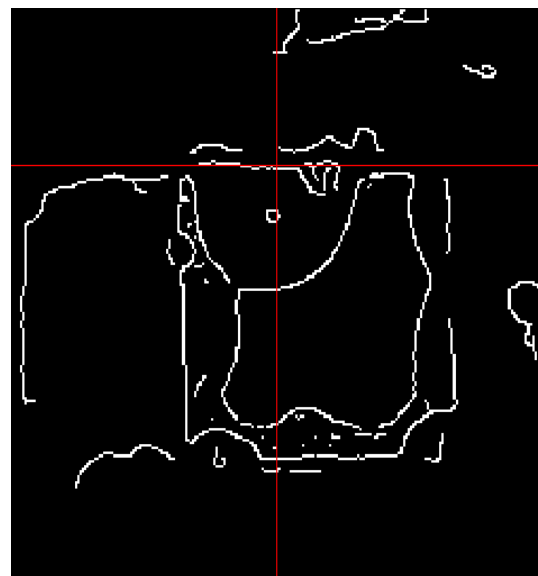


Figura 11: Aplicación del filtro de bordes y ayuda a la medición.

Como podemos observar, al escoger el primer punto, que se corresponde con el punto central de contacto de la burbuja con la superficie del medio poroso, el programa nos dibuja una recta paralela a la superficie del poro y otra recta perpendicular a ella, en un color que destaca sobre la imagen observada, con el objetivo de poder seleccionar con un error mucho menor el segundo punto de la medición. Además de esto, podemos aplicar sobre la imagen un filtro que sea capaz de detectar los bordes de los distintos elementos que componen la imagen, con el objetivo de poder escoger aún mejor el segundo punto de la medición.

2. Medición del radio a partir de 3 puntos:

También podemos realizar el cálculo del radio de una

burbuja teniendo la posición de tres puntos de su superficie, considerando que se trata de una burbuja completamente esférica. El problema de este tipo de medición consiste en que, al tener más puntos de medida, siendo además todos ellos variables de una captura a otra (ya que siempre debemos coger puntos de la superficie de la burbuja), tendríamos un mayor error en el cálculo. Por lo tanto, este tipo de medida resulta ser más adecuada en el caso de que podamos observar el volumen de la burbuja al completo, ya que nos aseguráramos así de que es completamente esférica. Para variaciones de volumen entre instantes sucesivos hemos comprobado que utilizando este método no obtenemos medidas consistentes y cometemos demasiados errores, por lo que resulta ideal para comparaciones entre variaciones de tamaños significativas, en las cuales sí que resulta ser mucho más preciso que el primer método, ya que no estaríamos midiendo una distancia característica de la burbuja, sino que mediríamos directamente su radio.



Figura 12: Medición del radio escogiendo 3 puntos

En este caso, al igual que en el anterior, nos hemos servido de un filtro para detectar los bordes de los objetos que aparecen en la imagen, resultándonos mucho más sencillo escoger correctamente los puntos en la superficie de la burbuja

Debido a la disposición de estas burbujas en el interior del medio poroso, para la mayoría de los casos nos encontraremos con burbujas que se encuentran en parte ocultas debido a la presencia de la matriz porosa, así como burbujas ancladas a la superficie de los poros. Además, a medida que avanzan los procesos de disolución el volumen de las burbujas varía ligeramente, por lo que necesitaremos de un método que nos permita reflejar estas variaciones de manera correcta.

Por ello supondremos que todas estas las burbujas están ancladas a la superficie del medio poroso, así que lo que mediremos será una longitud característica, que se corresponderá con la distancia desde el supuesto punto central de contacto de la burbuja con el medio poroso, hasta el punto que coincida con la superficie de la burbuja situado en el extremo contrario. Con este método conseguimos reflejar las pequeñas variaciones en el volumen de las burbujas, incluso cuando están a punto de disolverse.

Mediante este método, hemos recopilado las longitudes características para distintos instantes del experimento que resulten representativos a la hora de analizar el proceso. Por lo tanto, a lo largo de los distintos experimentos, incluido para el cálculo del volumen, utilizaremos estas longitudes características. Las medidas que tomamos mediante este método son proporcionadas en píxeles de la imagen, lo cual podríamos solucionar escalando alguna longitud conocida de las capturas, en este caso el tamaño del poro. Sin embargo, este paso no sería necesario, ya que, además de incluir un mayor error en las mediciones (tendríamos que medir el tamaño del poro para hacer la conversión), los cálculos que queremos realizar son exclusivamente cualitativos, es decir, que no nos interesan los valores concretos de los cálculos, sino la variación entre los distintos resultados, pudiendo relacionarlos además con el resto de las variables que medimos en nuestro experimento.

4.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Una vez hemos definido los procedimientos que se han seguido para obtener las distintas mediciones del problema: para la transmisividad, la presión en el interior de la cámara, y recolección de imágenes con ayuda de una cámara digital, procederemos a la explicación del desarrollo de los distintos experimentos para conocer con exactitud qué pasos hemos seguido en el laboratorio para la obtención de nuestros datos experimentales

- **Calibraciones:**

Para asegurarnos de que el proceso de medición se lleva a cabo de manera satisfactoria, en primer lugar necesitamos realizar una serie de calibraciones. Para comparar correctamente los distintos ritmos de disolución que se desarrollan en las disoluciones parciales debemos asegurarnos de que partimos de las mismas condiciones iniciales. Mediante las calibraciones nos aseguramos de que se mantenga una población de burbujas relativamente constante para todas las fases iniciales de los distintos experimentos, lo cual nos permite compararlos de manera adecuada, al partir en todos los casos de las mismas condiciones iniciales.

El procedimiento seguido consiste en realizar un incremento súbito de presión, y, una vez se transmite a la cámara, reducirla lo más rápido posible. Tomando como ejemplo una calibración realizada previamente al comienzo de un experimento podríamos observar el proceso:

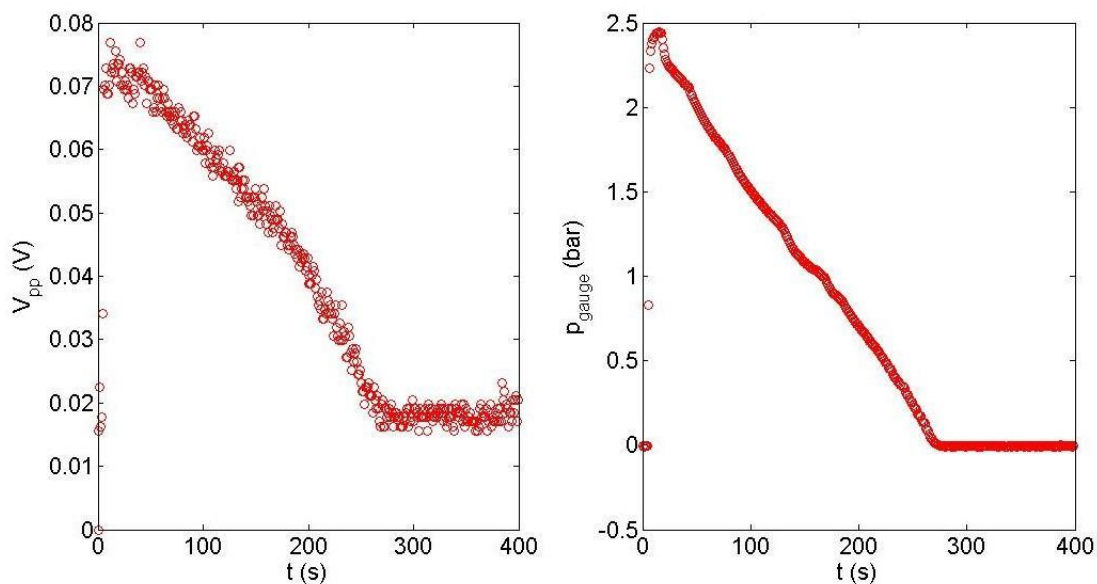


Figura 13: Calibración ABS 1.2 mm,, $\Delta P = 2.5$ bar

Podemos observar como ese incremento súbito en la presión (en este caso está representada como presión manométrica, $P_d = P - P_a$) se traduce en un aumento instantáneo en la transmisividad del medio poroso introducido en la cámara. Cuando la onda procedente del transductor avanza por el interior del medio poroso hacia el otro extremo de la cámara, debido a la presencia tanto del medio poroso en sí, como de burbujas (de aire o CO_2 según sea el medio que hayamos introducido en la cámara) nucleadas en su interior, se dispersa y atenúa por la presencia de ambos en su recorrido. Esto se traduce en una disminución de la tensión pico a pico (la cual relacionamos directamente con la transmisividad) medida por el hidrófono. Sin embargo, una vez se ha producido el golpe de presión, la amplitud pico a pico de la onda se

incrementa instantáneamente dado que se produce una reducción del volumen inversamente proporcional al incremento de presión.

Una vez se ha incrementado la presión en la cámara, resulta de vital importancia realizar la recuperación de la presión inicial en el menor tiempo posible. Al introducir un cambio en el sistema inicial (en este caso el incremento de presión), el equilibrio del nuevo sistema conducirá a otro punto completamente distinto. Con el cambio en la presión, variarían las condiciones de saturación para el agua, iniciándose un proceso de difusión másica en el cual el aire (o dióxido de carbono) contenido en las burbujas comenzaría a disolverse en el agua de la cámara. En el caso de las calibraciones, buscamos obtener las mismas condiciones al inicio y final de las mismas, por lo que nos interesa que este proceso de difusión se desarrolle lo menos posible.

Realizaremos sucesivas calibraciones para la misma presión hasta que obtengamos las mismas condiciones al iniciar y finalizar las calibraciones (es necesario comprobar la repetibilidad de las calibraciones para asegurarnos de que las condiciones iniciales son similares). El valor correspondiente al voltaje pico a pico más alto representaría el máximo valor que podemos alcanzar en una disolución parcial asegurándonos de que volveremos a obtener las mismas condiciones iniciales si interrumpimos el proceso (recuperando la presión original en el recinto). En el caso de no obtener resultados repetitivos para una presión en concreto, reduciríamos el incremento de presión y repetiríamos el proceso hasta conseguir la repetibilidad que buscamos.

Debemos asegurarnos previamente que al comienzo de cada experimento la manguera de presión no contenga ningún resto del fluido alojado en el interior de la cámara. Esto se produciría al realizar una bajada súbita de presión (cuando queremos recuperar la presión original en el recinto después de haber realizado una subida de presión). Al asegurarnos de que el fluido de la cámara ocupa completamente todo su volumen, si introducimos una bajada súbita de presión se produce una succión en la manguera y, al estar el fluido ocupando todo el recinto, consigue retroceder por la manguera de presión una vez hemos introducido reducido la presión. Si procedemos directamente con el desarrollo de otro experimento teniendo este fluido alojado en la manguera, al introducir un golpe de presión el fluido entraría súbitamente en la cámara. Idealmente buscamos que los golpes de presión no produzcan de ninguna manera movimiento en el fluido en el interior del recinto, aunque siempre se produce una introducción de burbujas en forma de spray cuando incrementamos la presión súbitamente en la cámara, lo cual puede reducir momentáneamente la transmisividad. Si adicionalmente a este spray introducimos ese fluido a gran velocidad, el fluido en el interior del tanque se perturbará aún más, pudiéndose producir errores en las mediciones para la transmisividad en el salto de presión.

Una vez hemos realizado las calibraciones correspondientes, podemos comenzar a realizar distintas mediciones que utilizaremos en el análisis posterior para caracterizar lo que sucede en el interior de la cámara presurizada. Hemos llevado a cabo dos tipos de experimentos:

- **Disolución parcial:**

El desarrollo de las disoluciones parciales consiste en realizar un golpe de presión (instantáneo) de nuestra elección en la cámara, permitiendo que la transmisividad alcance un valor predeterminado a partir del cual devolveríamos la cámara a la presión inicial, recuperando en un tiempo determinado la situación (o voltaje pico a pico) inicial. Recogiendo cada disolución parcial, podemos observar no sólo las variaciones de volumen en las burbujas que se producen relacionadas con el incremento de presión, sino también el ritmo al que se disuelven dichas burbujas en el periodo posterior al golpe de presión. Si realizamos una serie de experimentos siguiendo este mismo procedimiento, podremos obtener tanto las variaciones de volumen de las burbujas como los ritmos de disolución del agua o del CO_2 para distintas presiones, lo cual es de gran utilidad para caracterizar el proceso que se desarrolla en la cámara, relacionándolo con las distintas variables de las que disponemos (voltaje pico a pico, radio y volumen de las burbujas, presión, etc).

Posteriormente a los experimentos de disolución parcial realizamos un experimento de disolución total, en el cual aumentamos la presión hasta un nivel determinado, dejando que se disuelvan completamente las burbujas hasta conseguir que el voltaje pico a pico alcance su valor máximo. Una vez realizado esto, procederemos a realizar el experimento de recuperación del tamaño inicial de las burbujas. Recuperaremos la presión original en la cámara, y dejaremos que el sistema evolucione de tal manera que vuelvan a nuclear burbujas en el medio poroso, continuando hasta recuperar el mismo voltaje pico a pico (o similar) al del comienzo del experimento.

Tomando como ejemplo una disolución parcial realizada podemos observar el proceso realizado:

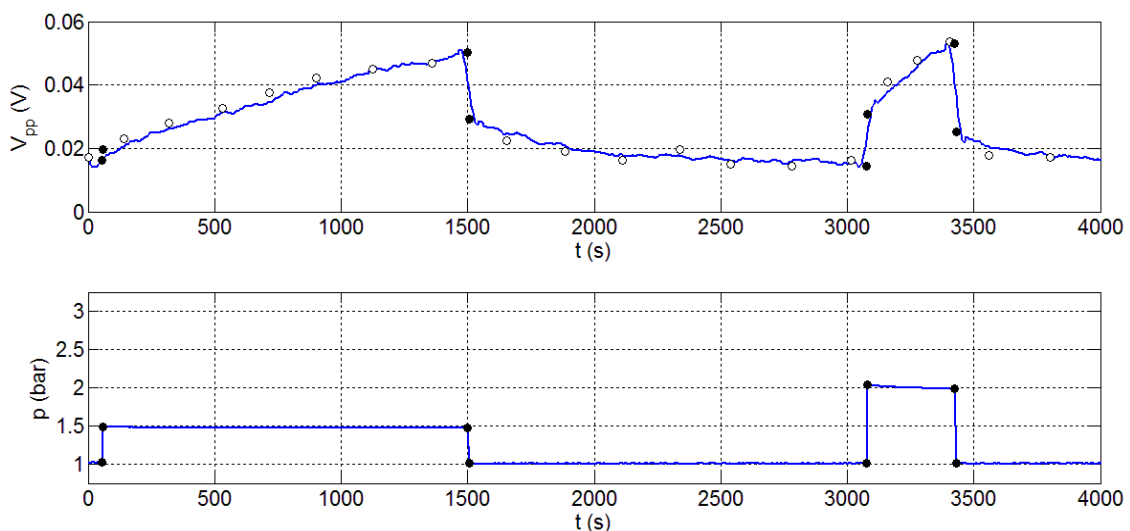


Figura 14: Experimentos de disolución parcial, ABS 0.9 mm

Como podemos observar en las gráficas para el voltaje pico a pico y la presión con respecto al tiempo, esta información nos permite relacionar diversas variables que resultan de gran importancia en este experimento. Es evidente que para los distintos incrementos de presión que podamos introducir en la cámara vamos a tener distintos ritmos de disolución para las burbujas nucleadas en el interior del medio poroso (como podemos observar en la imagen

superior, para dos presiones distintas tenemos dos valores para cada una de las pendientes), los cuales se podrían comparar y caracterizar en el análisis posterior. También podríamos realizar un análisis frecuencial tanto para diversos puntos en concreto (para posteriormente poder compararlos), como para la evolución de una frecuencia concreta a lo largo de un experimento, y poder compararla con las evoluciones de otras frecuencias que puedan resultar de interés para el experimento. El análisis frecuencial nos permite, entre otras cosas, comprobar qué frecuencias se transmiten mejor a través del medio poroso, una característica que, en principio, es única para cada medio poroso en cuestión. Si añadimos a todas estas comparativas la captación de imágenes a lo largo del experimento, podremos relacionar la variación en los tamaños de las burbujas con el resto de variables del experimento. Así, comprobaríamos si los golpes de presión efectivamente siguen una evolución isoterma como habíamos predicho ($P \cdot V = \text{constante}$), y además podríamos relacionarlo con la transmisividad (voltaje pico a pico) para ver qué relación existe entre ellos.

En el caso de la comparación con la disolución total, podemos llevar a cabo una comparación de las evoluciones de las distintas disoluciones parciales con la de la disolución total partiendo de las mismas condiciones iniciales. Esto resulta de gran interés al comparar puntos con el mismo voltaje pico a pico a lo largo del experimento, pudiendo encontrar diferencias al comparar puntos tanto antes (disoluciones parciales) como después (proceso de recuperación) de la disolución total, pudiendo comparar los distintos puntos mediante un espectro de frecuencias.

Cabe recalcar que para llevar a cabo este proceso es imprescindible habernos asegurado de que hemos realizado correctamente el proceso de calibrado previamente explicado. De esta manera, al tener las mismas condiciones iniciales para todos los experimentos de disolución parcial, podemos asegurarnos de que cualquier comparación que podamos realizar entre ellos va a ser representativa.

- **Disolución total:**

Para llevar a cabo los experimentos de disolución total hemos seguido el siguiente procedimiento: introducimos un golpe de presión en la cámara y dejamos evolucionar el sistema, y por lo tanto la disolución de las burbujas, hasta que alcancemos un valor máximo para el voltaje pico a pico, momento en el cual volveremos a recuperar la presión inicial en el interior del recinto, con el objetivo de visualizar la variación del voltaje pico a pico en el proceso de recuperación de la presión inicial. Visualizando un experimento de disolución total podemos conocer en qué consisten este tipo de experimentos:

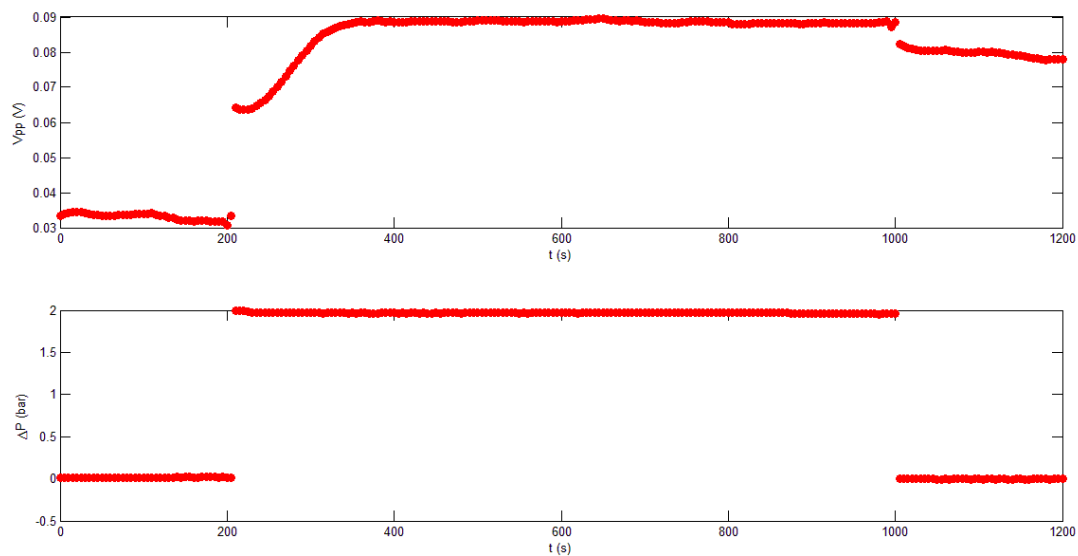


Figura 15: Disolución completa para ABS 0.9 mm, $\Delta P=2$ bar

En este caso no hemos necesitado realizar calibraciones previas a este tipo de experimentos, además de que hemos mantenido el mismo valor de incremento de presión para cada serie de experimentos. Esto se debe a que nos interesa conocer cómo es la evolución del sistema para distintas condiciones iniciales, pudiendo relacionar las variables del problema de similar manera a la que realizamos en los experimentos de disolución parcial. Al tener tantas evoluciones distintas como experimentos hagamos, podremos observar cómo varía el desarrollo de éstos según las condiciones iniciales de los mismos. Seremos capaces de ver cómo varían los ritmos de las disoluciones a lo largo del tiempo hasta alcanzar el voltaje pico a pico máximo, además de ver cómo son las distintas variaciones en el voltaje pico a pico para un mismo salto de presión con distintas condiciones iniciales.

Además, al igual que los experimentos de disolución parcial, podremos realizar tanto un análisis frecuencial con el objetivo de analizar la evolución del pulso inducido por el transductor para las distintas condiciones iniciales, como un análisis de las imágenes captadas para relacionar las dimensiones de las burbujas y los poros con la evolución de las distintas variables del problema.

El valor máximo de la transmisividad (voltaje pico a pico máximo) se correspondería con la transmisividad acústica del medio poroso cuando no existen burbujas en su interior. Este valor, relacionado únicamente con la geometría del medio poroso, tiene una ligera variabilidad. Hemos podido comprobar que, incluso para experimentos realizados de manera consecutiva,

esta característica puede tomar distintos valores a lo largo de los distintos ensayos, por lo que debemos buscar que la variación del mismo sea la mínima posible de cara a compararlos.

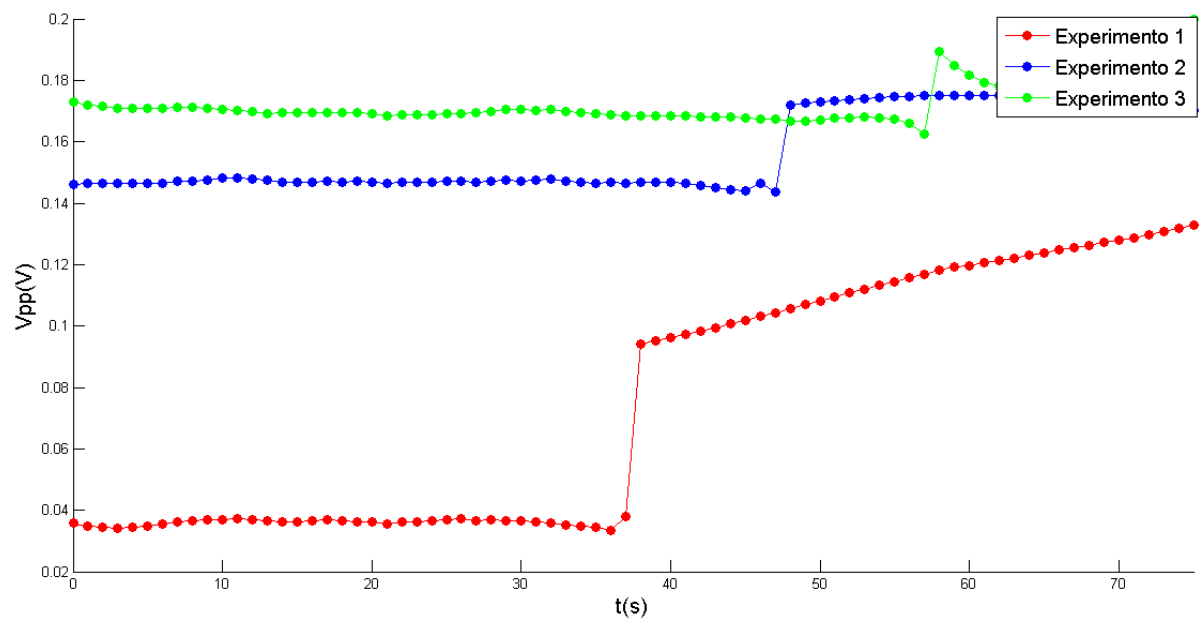


Figura 16: Distintas condiciones iniciales, ABS 1.2 mm

Para ello, realizamos cada conjunto de disoluciones consecutivamente en un mismo día, consiguiendo que la posición del medio poroso sea la misma para todos ellos (debido a que lo colocamos manualmente al comienzo de los experimentos), y la variación de la amplitud máxima entre ellos se pueda reducir lo máximo posible.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Presentaremos todos los resultados experimentales obtenidos para los distintos tamaños de poro, analizando y comparando las diferencias entre ambos para observar sus similitudes y diferencias.

- Análisis referido a la transmisividad

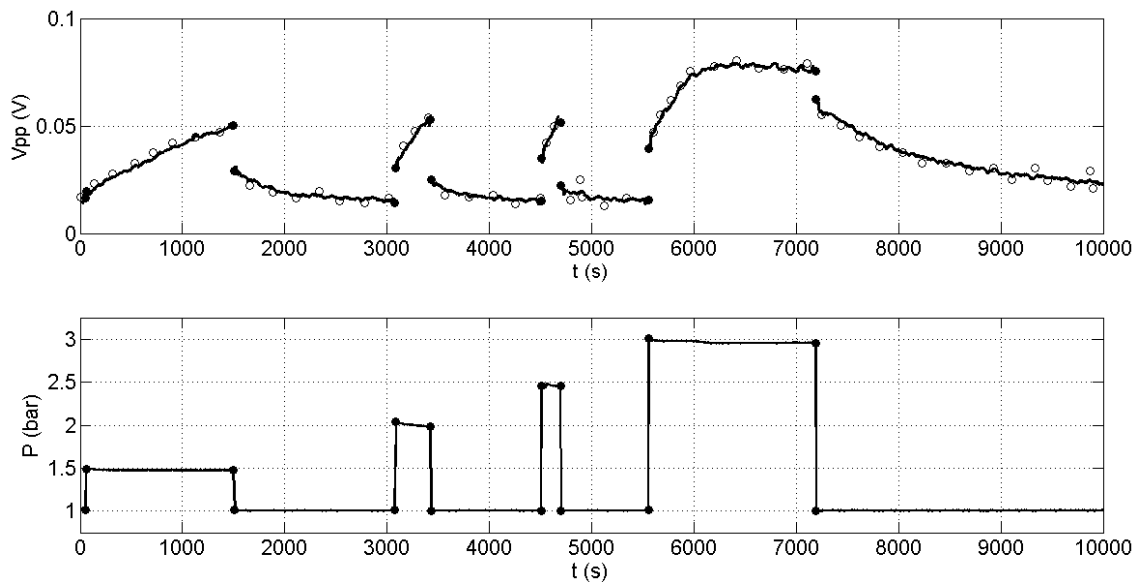


Figura 16: Experimento de disoluciones parciales y total para ABS 0.9 mm

En la gráfica superior se encuentra representada la evolución del voltaje pico a pico máximo, que, como hemos mencionado antes, representaría el valor para la transmisividad del conjunto medio poroso – burbujas, con respecto al tiempo del experimento. En la gráfica inferior se nos muestra el valor de la presión en el interior del recinto, frente al mismo tiempo transcurrido para la medición del voltaje pico a pico máximo, por lo que podemos comparar la evolución de ambos en el experimento para poder comprender lo que sucede en el interior de la cámara presurizada. También hemos realizado el mismo tipo de experimento para un tamaño de poro de 1.2 milímetros:

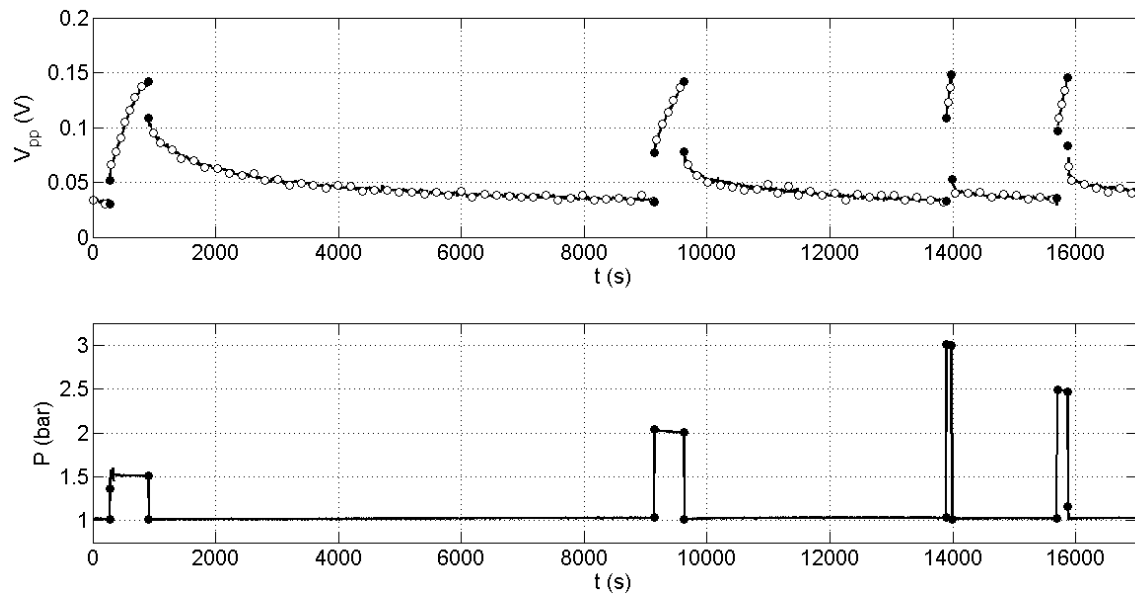


Figura 17: Experimento de disoluciones parciales para ABS 1.2 mm

De estas gráficas podemos extraer multitud de datos que nos resultarán de gran utilidad. Como podemos observar hemos realizado tres disoluciones parciales, en las cuales partimos siempre desde las mismas condiciones iniciales. Después del golpe de presión, llegamos a un valor límite de 0.05 Voltios de voltaje pico a pico, en el caso de un tamaño de poro de 0.9 milímetros, definido anteriormente en las calibraciones, a partir del cual volvemos a recuperar la presión inicial en el interior del recinto, con el objetivo de recuperar las condiciones iniciales para poder realizar la siguiente disolución parcial. Para el caso del medio poroso con un tamaño de poro de 1.2 milímetros, el voltaje máximo para recuperar las condiciones iniciales que hemos definido en las calibraciones es de 0.15 Voltios.

Encontramos diferencias significativas en los resultados de ambos experimentos según el tamaño del poro que estemos analizando. En primer lugar, atendiendo al proceso de nucleación de burbujas, encontraremos una mayor población en el caso del tamaño de poro de 0.9 milímetros. Esto es debido a la mayor superficie porosa que se encuentra en contacto con el fluido sobresaturado, que supone una zona de nucleación preferente para estas burbujas. Esto se traduce en una mayor atenuación inicial en la mayoría de los casos para el tamaño de poro de 0.9 milímetros, teniendo en cuenta que el proceso de nucleación de las burbujas es completamente aleatorio. Por otra parte, encontramos diferencias notables en cuanto a la transmisividad de los medios porosos para distintos tamaños de poro cuando no se encuentran nucleadas burbujas en su interior (proceso de disolución total). Si comparamos dos disoluciones totales, una perteneciente a un experimento para un tamaño de poro de 0.9 milímetros, y otra a un tamaño de poro de 1.2 milímetros:

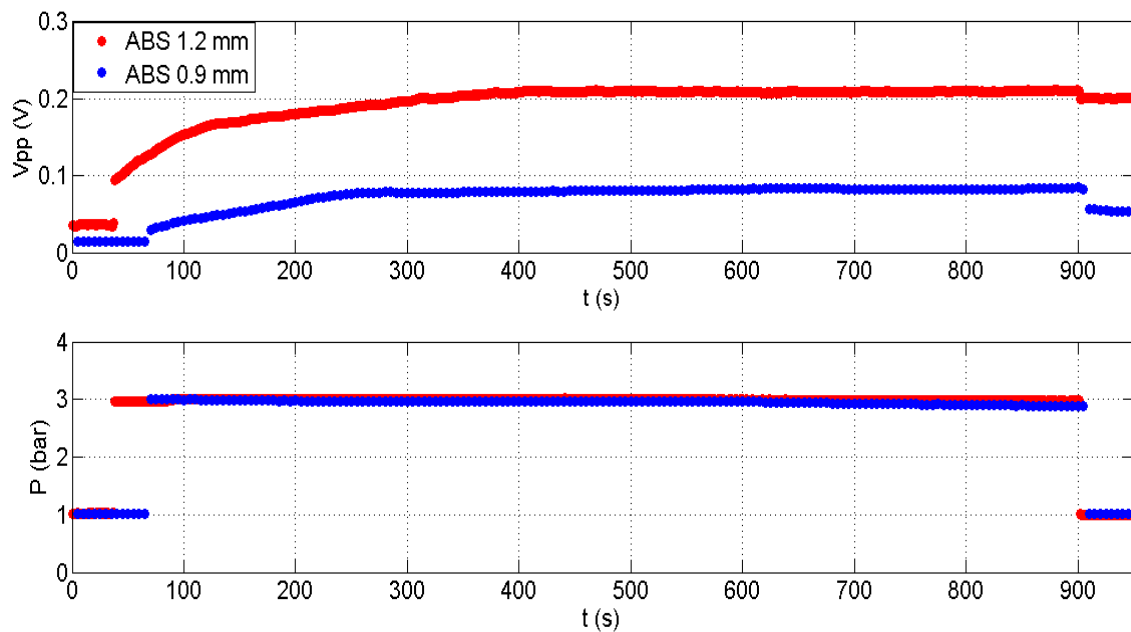


Figura 18: Comparación de la evolución de la transmisividad para tamaños de poro de 0.9 y 1.2 milímetros

Al observar estos resultados, podemos comprobar la gran diferencia de transmisividad que existe entre ambos. Al mantener la presión en el recinto durante un intervalo de tiempo suficiente como para que desaparezcan las burbujas, podemos observar que ambos alcanzan niveles muy distintos para la esta transmisividad, siendo en el caso del medio poroso de mayor tamaño de poro (un 33 % mayor) más del doble que la transmisividad captada para el medio poroso de menor tamaño de poro. Esto es debido a la mayor presencia del material poroso que se encuentra la onda acústica al propagarse por la cámara, por lo que interactuará más con este medio, atenuándose mucho más al avanzar que en el caso de la matriz porosa con mayor tamaño de poro.

También podríamos preguntarnos si realmente tenemos la misma configuración de burbujas para puntos con el mismo voltaje pico a pico. Como podemos observar en la gráfica, tenemos puntos tanto para las disoluciones parciales como para las disoluciones totales (en el caso del tamaño de poro de 0.9 milímetros) en los cuales obtenemos la misma medida para el voltaje pico a pico, pero no sabemos si realmente esta medida se corresponde con la misma configuración de burbujas para cada caso. Para ello, observaremos la onda acústica captada para distintos instantes con el mismo pico a pico, en este caso para un tamaño de poro de 0.9 milímetros y un valor pico a pico de 0.05 Voltios, pudiendo observar la diferencia entre cada uno de ellos:

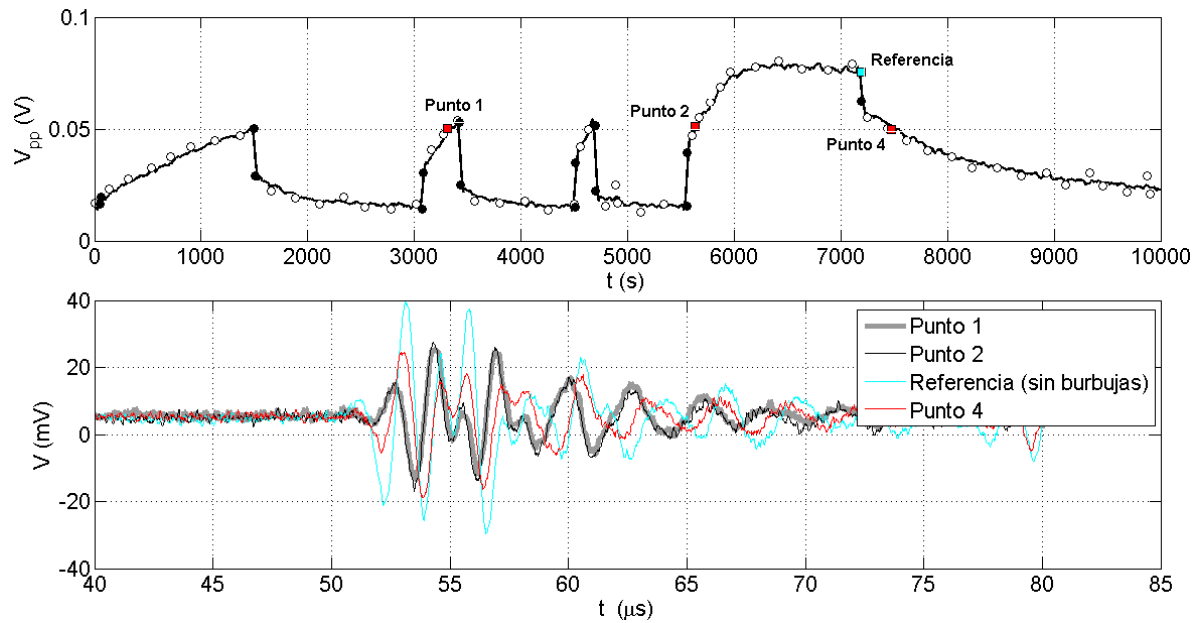


Figura 19: Comparación de puntos característicos, ABS 0.9 mm

Como podemos observar, hemos tomado distintos puntos que sean representativos a lo largo del experimento para el mismo voltaje pico a pico. En la gráfica inferior, podemos analizar la forma de cada onda captada por el hidrófono. En el caso de las ondas pertenecientes tanto al punto 1 como al punto 2 (pintadas en gris y en negro, respectivamente), podemos observar como la forma de ambas ondas es prácticamente similar, por lo que podríamos asegurar que tenemos la misma configuración de burbujas en el interior del medio poroso. Sin embargo, si observamos la forma de la onda una vez se ha producido la disolución total, y se ha dejado que el proceso de recuperación avance hasta el mismo voltaje pico a pico máximo que los otros dos puntos representados (Punto 4), nos encontramos con que la forma de la onda captada (pintada en rojo) es completamente distinta a las dos anteriores. Esto es debido a que, una vez se ha producido la disolución completa de las burbujas en su interior, al recuperar la presión inicial en el recinto se vuelve a producir la nucleación de esas burbujas debido a que el agua se encuentra sobresaturada de aire, pero con una configuración completamente distinta de burbujas que la que teníamos inicialmente. Esto lo podemos observar recogiendo las capturas de la cámara para dichos instantes:

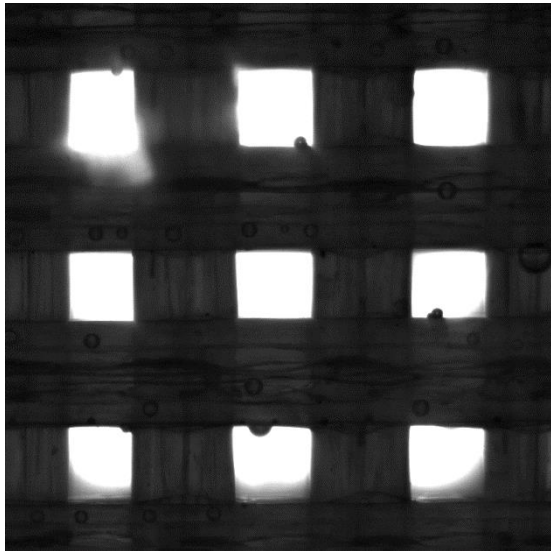


Figura 20: Captura punto 2

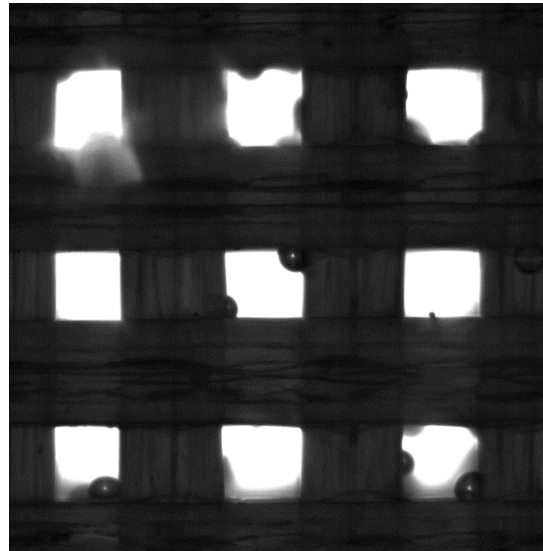


Figura 21: Captura punto 4

Como podemos observar en ambas imágenes, la población de burbujas formada en cada caso es completamente distinta. El conjunto matriz porosa – burbujas nos lleva a captar el mismo voltaje pico a pico máximo en ambos casos, pero con una forma distinta para cada onda definida únicamente por la población de burbujas nucleada en el interior.

También podemos analizar el comportamiento de los intervalos del experimento relativos al proceso de recuperación de las condiciones iniciales (recuperación del voltaje pico a pico máximo inicial). En este caso vemos cómo el intervalo de tiempo necesario para recuperar las condiciones iniciales se reduce a medida que aumentamos la variación en la presión. Esto es debido al tiempo transcurrido manteniendo el incremento de presión durante el cual se ha desarrollado el proceso de disolución parcial. Al imponer un valor máximo para todas las disoluciones parciales, a medida que vamos incrementando el golpe de presión el intervalo de tiempo antes de alcanzar ese valor máximo es menor, debido entre otros motivos a la mayor disminución del volumen inicial de las burbujas.

Así, para la primera disolución parcial (a 1.5 bares), se producirá una menor disminución del volumen inicial que en el resto debido al menor incremento de presión, y necesitaremos mantener la presión en el recinto un tiempo mayor para conseguir alcanzar ese voltaje pico a pico máximo. Durante este proceso las burbujas se van disolviendo hasta alcanzar ese valor para la transmisividad, punto en el cual recuperamos la presión inicial. Entonces, como consecuencia del menor incremento de presión, se producirá una menor recuperación del volumen inicial de la burbuja. En este punto, después de recuperar la presión inicial, en el agua se encuentra disuelta una mayor cantidad de aire debido a un mayor periodo de disolución. El agua se encuentra sobresaturada de ese aire que anteriormente se encontraba en el interior de las burbujas, por lo que tendremos que esperar un tiempo mayor que en el resto de experimentos para poder recuperar el valor inicial de la transmisividad.

Sin embargo, si observamos el resto de disoluciones parciales, vemos que a medida que aumentamos el incremento de presión la reducción del volumen inicial por el golpe es mayor, por lo que el tiempo que transcurre en el proceso de disolución hasta alcanzar ese voltaje pico

a pico límite es menor. Así, la cantidad de aire disuelta en el agua es menor, y al recuperar la presión en el recinto el tiempo transcurrido durante el proceso de recuperación se reduce considerablemente.

- Análisis de imagen

Unido al proceso de captación y análisis de las señales acústicas emitidas por el transductor, podemos hacer uso de las imágenes obtenidas con una cámara digital durante el transcurso de los experimentos para conocer en profundidad el comportamiento de las burbujas durante los procesos de disolución y recuperación de su volumen, pudiendo relacionar estas mismas variables con las obtenidas anteriormente en el análisis de la transmisividad.

Podemos observar que en los saltos de presión se produce un incremento repentino en la variación del voltaje pico a pico máximo. Esto se produce como consecuencia de la disminución del volumen de las burbujas debido al golpe de presión, que según las características del proceso podría ser considerado isoterma (hipótesis que comprobaremos más adelante). Como podemos observar en la imagen, a medida que incrementamos el golpe de presión la variación en la transmisividad aumenta, ya que el incremento de presión en un proceso isoterma es proporcional a la relación entre el volumen final y el volumen inicial. Debido a que el fluido que se encuentra en el interior de las burbujas es un gas, podemos aplicar la ley de los gases ideales para obtener la ecuación para una evolución isoterma:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Comparando dos estados sucesivos, uno anterior al golpe de presión y otro posterior, y definiendo las propiedades de cada uno de ellos:

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{P_2 \cdot V_2} = \frac{n_1 \cdot R \cdot T_1}{n_2 \cdot R \cdot T_2}$$

Por último, la cantidad y composición del gas que se encuentra en el interior de las burbujas es el mismo para ambos instantes, por lo que el número de moles no sufre ningún cambio. Teniendo en cuenta que es una evolución isoterma:

$$\text{Evolución isoterma: } T = \text{constante} \quad , \quad \frac{P_2}{P_1} = \frac{V_1}{V_2} \quad , \quad P_i \cdot V_i = \text{constante}$$

Esta disminución del volumen de las burbujas provoca un aumento instantáneo en la transmisividad, ya que la presencia de un volumen menor de burbujas nucleado en el interior de la matriz porosa implica que la onda acústica se dispersará y atenuará menos, con el consiguiente aumento de la transmisividad. El mismo comportamiento se podría aplicar en las recuperaciones de la presión, en las cuales, al disminuir la presión repentinamente se produce

un aumento de volumen de las burbujas, que provoca una disminución en la transmisividad del conjunto.

En primer lugar, podemos hacer uso del análisis de imagen para comprobar la hipótesis que habíamos realizado al definir como isoterms los golpes de presión. En este caso, para realizar las mediciones con más exactitud, y debido a que hemos escogido una burbuja que se puede observar por completo, hemos podido medir el radio de las burbujas escogiendo 3 puntos de la superficie y calculando el radio. Para este método hemos obtenido los siguientes resultados:

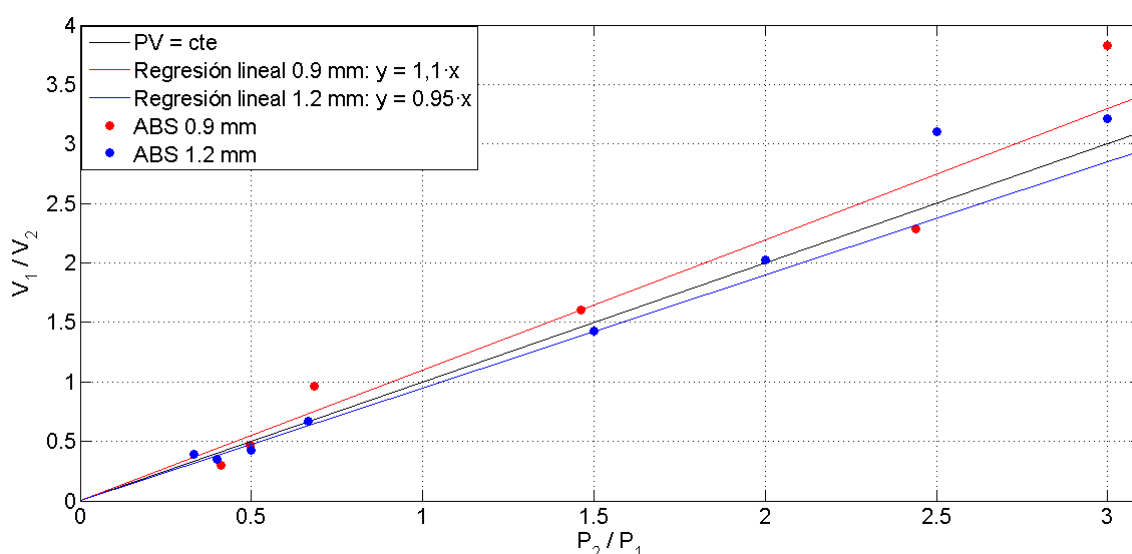


Figura 22: Comparación de variaciones de presión con variaciones de volumen, comportamiento isoterma.

Como podemos observar, aún teniendo en cuenta los errores que podemos cometer en la selección de los puntos, vemos que las evoluciones calculadas se asemejan mucho a la evolución isoterma supuesta anteriormente. Vemos que la tendencia en la variación del volumen de las burbujas según la fracción entre la presión final y la presión inicial, representada con la recta de color rojo, es muy similar a la recta de color negro, la cual se corresponde con la evolución $P \cdot V = \text{constante}$, encontrando muy pocas diferencias entre las dos situaciones, por lo que la hipótesis realizada en cuanto a esta evolución es correcta.

En cuanto a la variación de la transmisividad posterior al golpe de presión, vemos que es distinta para cada uno de los incrementos de presión. En este proceso, permitimos que las burbujas se disuelvan debido al cambio de presión, hasta alcanzar un límite máximo de 0.05 Voltios de pico a pico en el caso del tamaño de poro de 0.9 milímetros, 0.15 Voltios en el caso de un tamaño de 1.2 milímetros. Esta evolución, por lo tanto, podemos relacionarla en cierta manera con el ritmo de disolución de las burbujas, ya que al disolverse van reduciendo progresivamente su volumen, lo cual implica un aumento progresivo de la transmisividad durante el proceso de disolución. Así, podemos hacer una medición de la pendiente del voltaje pico a pico para cada incremento de presión y comparar los resultados:

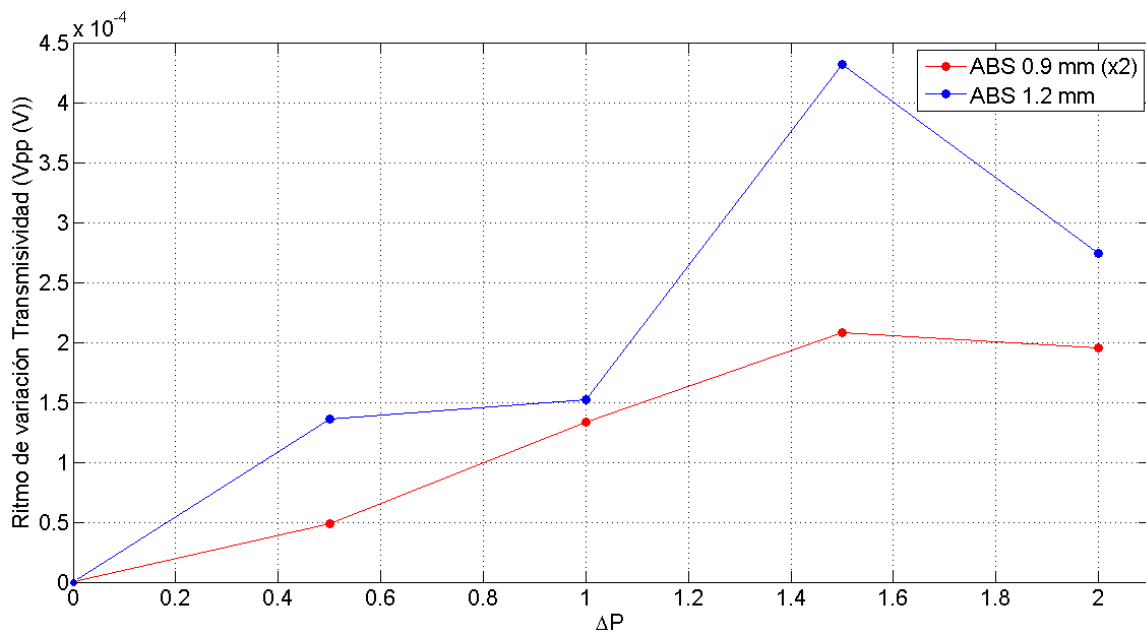


Figura 23: Ritmo de variación de la transmisividad (Vpp) frente al incremento de presión

Para calcular las pendientes correspondientes a la evolución de los voltajes pico a pico para cada tamaño de poro, hemos hecho uso de un polyfit ("Polynomial curve fitting"), el cual nos devuelve los coeficientes de la ecuación que mejor se ajusta a los datos disponibles, según el tipo de función que escojamos. En este caso hemos escogido un polyfit lineal, el cual nos devolverá, previa selección de los datos de los cuales queramos realizar el cálculo, el valor tanto de la ordenada en el origen, como de la pendiente, que es el valor que queremos obtener para poder compararlo según el incremento de presión que se introduzca en la cámara.

Hemos doblado el valor de las distintas pendientes para la curva que se corresponde con el medio con un tamaño de poro de 0.9 milímetros para que la comparación sea más efectiva. Podemos comprobar que la tendencia de ambas curvas, teniendo en cuenta los errores que se hayan podido cometer en las mediciones, es la misma. Podemos comprobar que, al no tener incremento de presión en la cámara, todo el sistema está en equilibrio (la concentración en la superficie de la burbuja tiene el mismo valor que la concentración alejada de ella en fluido que le rodea), por lo que no se produce ningún cambio en la transmisividad, a menos que el agua en la cámara siga en estado de sobresaturación, situación en la cual se transferirá aire disuelto en el agua de la cámara hacia las burbujas existentes (proceso de recuperación), reduciéndose así el valor de la transmisividad.

Sin embargo, una vez introducido el golpe de presión, las condiciones del equilibrio cambian. La concentración en la superficie de la burbuja se incrementa proporcionalmente a la presión, por lo que ya no se encuentra en equilibrio con la concentración del fluido que se encuentra a su alrededor, produciéndose entonces el proceso de disolución de estas burbujas. Como vemos para los primeros tres sucesivos de incrementos de presión, correspondientes a 0.5, 1 y 1.5 bares, la variación de los ritmos según el incremento de presión mantiene la misma tendencia en ambos medios.

Al ir incrementando la presión en el recinto, el ritmo de variación inicial del voltaje pico a pico se va incrementando también, lo que podríamos relacionar con un ritmo de variación mayor del volumen de las burbujas, ya que son éstas las únicas que influyen directamente en el valor final de la transmisividad, considerando que la presencia del medio poroso atenúa de la misma manera la onda acústica a lo largo de todo el experimento.

Sin embargo, llega un punto en el cuál el incremento de presión no tiene tanta importancia en el ritmo de variación de la transmisividad, como podemos observar en el valor para un incremento de 2 bares con respecto a la presión atmosférica. Este ritmo de variación inicial del voltaje pico a pico para un incremento de presión de 2 bares es menor que el ritmo de variación a una presión menor, en este caso de 1.5 bares, por lo que nos podríamos preguntar cuál es el factor que interviene, además de estas variaciones en la presión, en esta reducción en el ritmo de variación de la transmisividad.

Sabiendo que la contribución del medio poroso a la atenuación de la onda acústica es un valor que se mantiene constante a lo largo del proceso, y que las variaciones en la atenuación que ejerce el conjunto matriz porosa – burbujas son debidas a la variación del volumen de éstas a lo largo del tiempo, influyendo en gran parte la presión del recinto, podemos recurrir al análisis de imagen para conocer de mejor manera cuál es la variación en el volumen de las burbujas a lo largo del experimento. Así, conociendo estas variaciones, podremos caracterizar de una manera más efectiva el proceso de disolución de las burbujas cuando se encuentran confinadas, en este caso en el interior de un medio poroso, además de comprobar la influencia que tienen en la variación de la transmisividad y la atenuación, lo cual nos será de gran utilidad para el análisis posterior que queremos realizar.

En este caso, y debido a que necesitamos conocer con exactitud la variación del volumen a medida que avanza el experimento, hemos medido la longitud característica de estas burbujas, concepto que ya ha sido definido previamente en el apartado de métodos. Escogiendo dos burbujas para nuestro estudio, obtenemos los siguientes resultados:

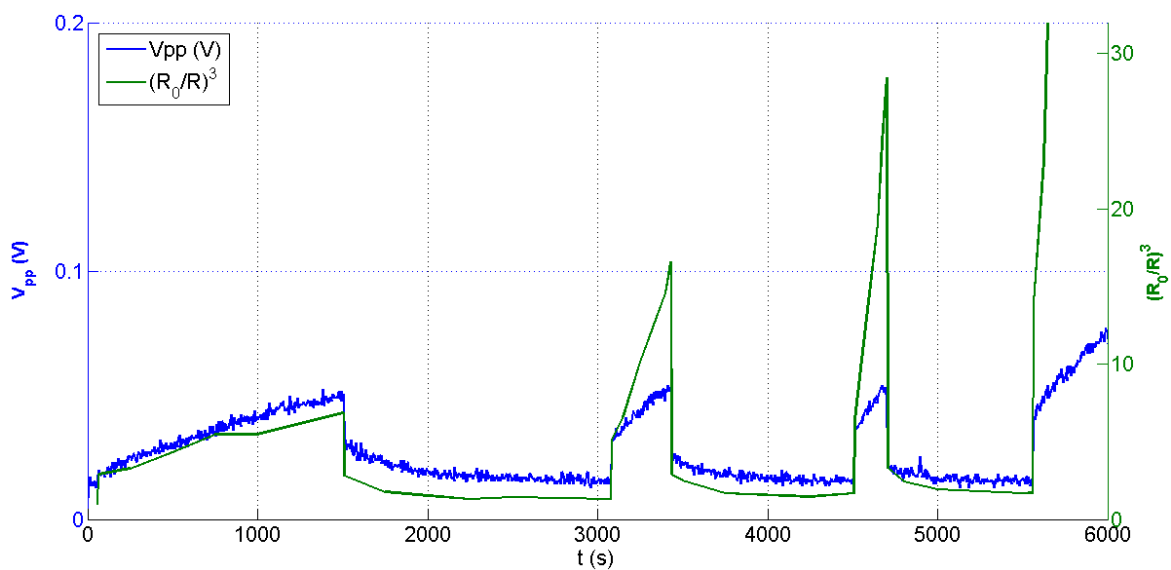


Figura 24: Comparación de la evolución de la transmisividad con el volumen de las burbujas.

Como podemos observar, la curva azul representa la variación del voltaje pico a pico representada anteriormente para el experimento de un tamaño de poro de 0.9 milímetros, mientras que la curva verde representa la relación entre el volumen inicial, que hemos tomado como referencia para el instante inicial del experimento, y el volumen de la burbuja en cada instante del tiempo. Esta relación de radios que hemos calculado crece cuando se produce tanto la contracción repentina (por el golpe de presión) como el proceso de disolución de las burbujas, debido a que el denominador (radio en cada instante del experimento de la burbuja) disminuye al desarrollarse estos dos procesos. Podemos observar como, a medida que disminuye el volumen de la burbuja, aumenta tanto la transmisividad (voltaje pico a pico máximo) como la relación entre el volumen inicial de la burbuja y el volumen en cada instante de tiempo. Así, podemos afirmar que a medida que va disminuyendo el radio de las burbujas nucleadas, va aumentando la transmisividad del conjunto, llegando finalmente a un valor pico que se corresponde con la transmisividad del medio poroso sin burbujas en su interior.

En este caso, podemos observar que, instantes después del último incremento de presión, el valor de la relación entre el volumen inicial y el volumen concreto durante esas medidas tiene un valor muy alto. Esto se debe al volumen de las burbujas durante ese periodo, el cual ha mermado tanto que la fracción de volúmenes representada toma un valor muy alto, lo cual indica que las burbujas se encuentran prácticamente disueltas.

Podemos realizar este mismo análisis para el medio poroso de 1.2 milímetros de tamaño de poro:

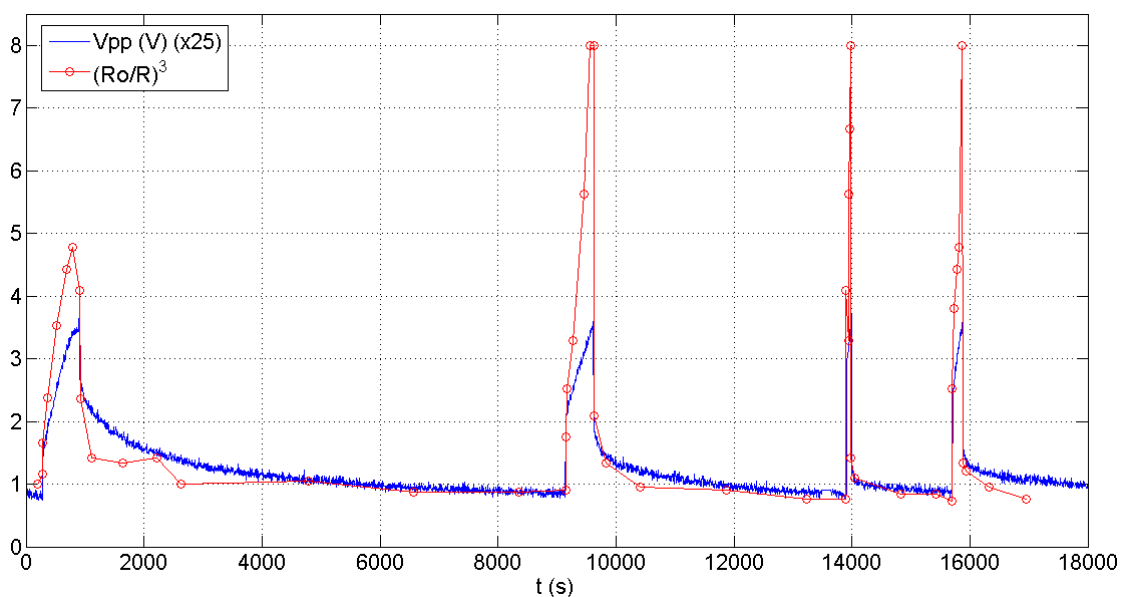


Figura 25: Medida de voltaje pico a pico máximo y volumen, ABS 1.2 mm

En el cual podemos observar que obtenemos exactamente los mismos resultados, por lo que las conclusiones obtenidas para el medio poroso con tamaño de poro de 0.9 milímetros se pueden aplicar por igual a este caso.

Observando ambas gráficas, podemos comprobar cómo, a medida que cambiamos el valor del golpe de presión introducido en la cámara, el ritmo de disolución de las burbujas varía de unos

valores de presión respecto a otros, aumentando su valor a medida que este golpe de presión aumenta. En este caso, podemos cuantificar la medida de estos ritmos para conocer realmente cómo varían según el incremento de presión que estemos introduciendo, comparando los resultados obtenidos.

Para realizar este análisis, recuperamos el mismo método utilizado anteriormente para cuantificar el ritmo de variación de la transmisividad según el incremento de presión introducido en la cámara presurizada, y se lo aplicamos en este caso a las medidas que hemos obtenido de las dimensiones de las burbujas, obteniendo los siguientes resultados:

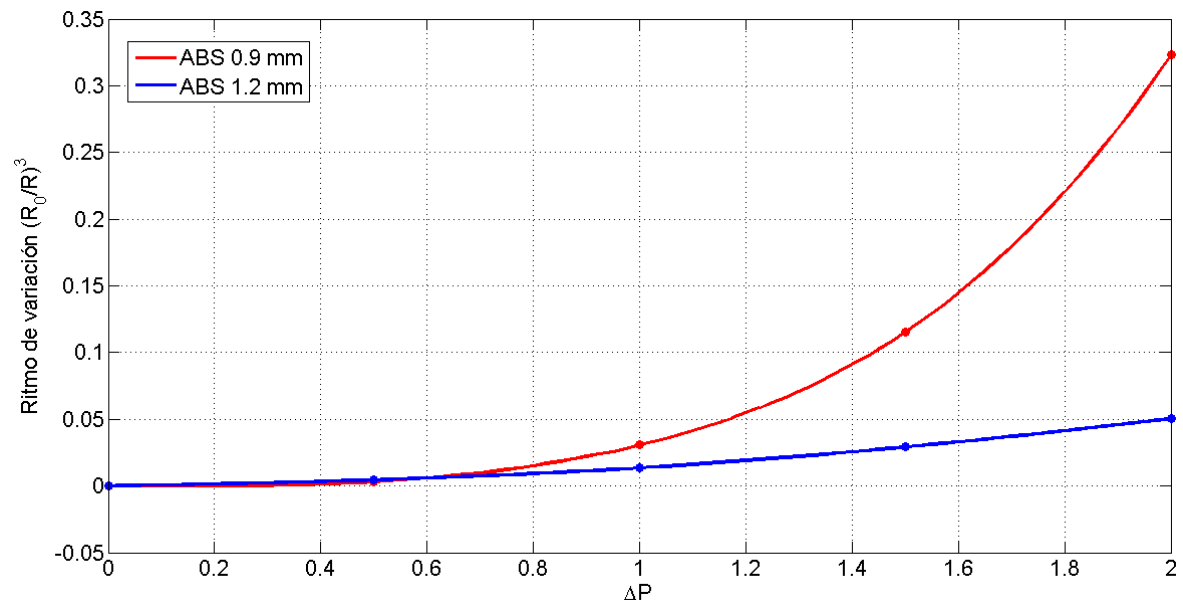


Figura 26: Comparación de los ritmos de variación del volumen frente a los incrementos de presión

Debemos recordar que en todas estas medidas se ha partido de las mismas condiciones iniciales, específicas según el tamaño del poro que hayamos utilizado. Al medir los ritmos de disolución para cada tamaño de poro e incremento de presión, podemos extraer diversas conclusiones. Para empezar, podemos observar como la tendencia de los ritmos de disolución para ambas configuraciones de poro es similar: a medida que el incremento de presión en la cámara es mayor, el ritmo de disolución de las burbujas nucleadas en el interior de los poros se incrementa. Si observamos la medida de los ritmos de disolución escalada convenientemente para un tamaño de poro de 1.2 milímetros:

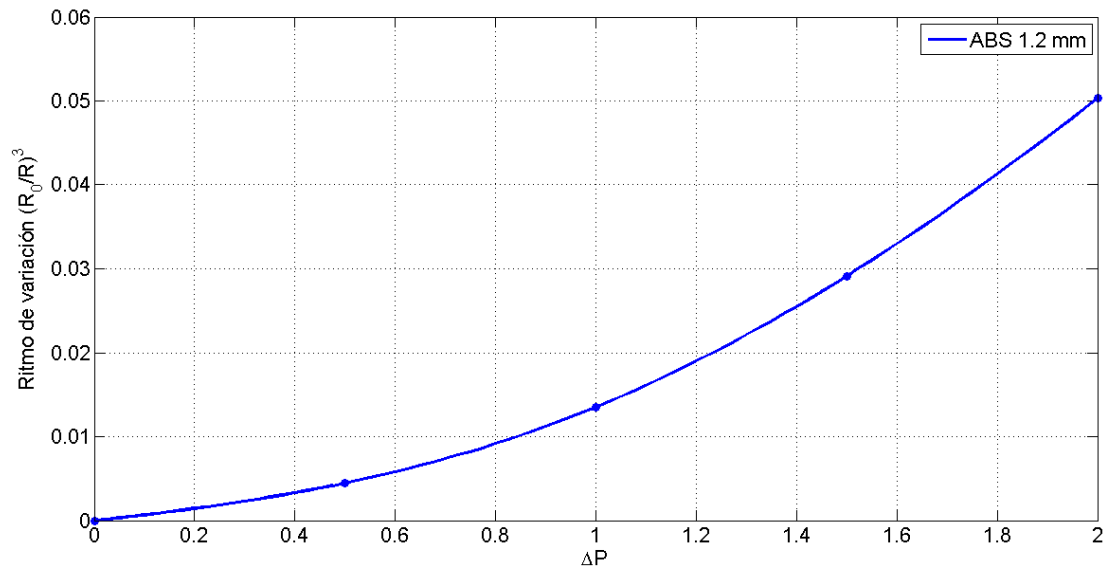


Figura 27: Ritmo de variación del volumen en función del incremento de presión, ABS 0.9 mm

Podemos comprobar así que ambas tienen una tendencia exponencial, incrementándose el ritmo de disolución a medida que aumentamos el golpe de presión en el recinto.

Recuperando los datos obtenidos para la evolución de la transmisividad según el incremento de presión introducido (figura ¿?), vemos que ambas siguen una tendencia similar para los valores de incrementos de presión para 0.5, 1 y 1.5 bares de presión, mientras que para un incremento de presión de 2 bares obtenemos resultados contrarios. Así, mientras que el ritmo de disolución de las burbujas crece exponencialmente con este aumento de la presión, el ritmo de variación de la transmisividad para un incremento de presión de 2 bares se reduce con respecto al valor correspondiente a un incremento de presión menor, en este caso de 1.5 bares.

Por lo tanto, a pesar de que las burbujas se están disolviendo a un ritmo más rápido debido a un incremento de presión mayor, este cambio no se refleja de igual manera en el ritmo de variación de la transmisividad, el cual no sólo no se incrementa, como cabría esperar, sino que se reduce con respecto a su valor para un incremento de presión inferior.

La medida de la transmisividad (o de la atenuación), como ya hemos mencionado anteriormente, varía en función del volumen de burbujas que se encuentra nucleado en el interior del material poroso. Los resultados reflejan que, al ir incrementando la presión en sucesivas disoluciones con las mismas condiciones iniciales, llega un punto en el cual el ritmo de variación de la transmisividad disminuye al incrementar el valor del golpe de presión. Esto puede ser debido a una variación en la influencia que el volumen de las burbujas tiene en la variación de la transmisividad. Se podría describir el proceso como que, llegados a un tamaño determinado de burbujas lo suficientemente pequeño, la variación del volumen de las mismas tiene una menor influencia en la variación del voltaje pico a pico. Al incrementar el golpe de presión, el volumen de estas burbujas debido al cambio inicial de presión se reduce en una mayor medida que en incrementos de presión de menor valor (ya que se cumple que $P \cdot V = \text{constante}$), llegando a alcanzar un tamaño medio en conjunto suficiente para que su influencia en la variación de la transmisividad disminuya. Es esperable que la reducción de su influencia sea mayor a medida que seguimos incrementando la presión, comprobación que se podría realizar en experimentos futuros.

6. ANÁLISIS FRECUENCIAL

6.1 DESCRIPCION DEL PROCESO

Para poder analizar con mayor detalle y entender los procesos que se desarrollan durante el avance del experimento, podemos aplicar el conocimiento disponible referente a la acústica, rama de la física que se encarga de estudiar la propagación de ondas mecánicas (sonido) a través de los distintos medios materiales.

Así, la onda acústica que produce nuestro transductor, al propagarse en forma de ondas mecánicas a lo largo del fluido que se encuentra en el interior de la cámara, interactuará con los elementos que se encuentre en su avance, como el medio poroso y las burbujas nucleadas en su interior.

Al tratarse de un movimiento ondulatorio, podemos hacer uso de la Transformada de Fourier, herramienta que nos permite estudiar la señal recibida por el hidrófono como una superposición de ondas: una suma de ondas sinusoidales, llamadas armónicos, con características como la amplitud, frecuencia, longitud de onda, y fase, bien determinadas. Al descomponer el sonido mediante este proceso, nos permite analizar cada componente (sinusoide) de manera independiente para cada frecuencia, lo cual facilita de gran manera el análisis, combinando más tarde los resultados aplicando el principio de superposición, el cual nos indica que podemos descomponer un problema complejo en problemas más sencillos, pudiendo más tarde combinar los resultados de la descomposición para obtener la solución al problema complejo.

- Análisis frecuencial

La propagación de la onda acústica, como se ha indicado anteriormente, involucra transporte de energía a través de ondas mecánicas que se propagan a través de un medio elástico, el cual, mediante su compresión y expansión, produce la propagación de este tipo de ondas. Esta energía que se propaga se distribuye entre los diversos armónicos que la componen, por lo que, aplicando la transformada de Fourier, podemos determinar la distribución de dicha energía propagada entre sus distintas componentes. Al comparar la distribución en frecuencias de la energía transmitida por la onda producida inicialmente, con la distribución en frecuencias de la energía transmitida de la onda captada por el transductor, podremos analizar la influencia que ejercen tanto el medio poroso como las burbujas en su propagación.

Podemos comenzar este estudio observando un conjunto de ondas características útiles de cara a nuestro análisis que hemos obtenido durante las mediciones. Por una parte, contamos con la medida de la onda transmitida por el transductor sin presencia del medio poroso, además de las ondas acústicas capturadas para ambos medios porosos sin la presencia de burbujas nucleadas en su interior. Por otra parte, contamos con un gran número de señales obtenidas para ambos medios porosos con burbujas nucleadas en su interior a lo largo de la evolución de los distintos experimentos.

Aplicando la transformada de Fourier podemos obtener el espectro en frecuencias de las señales para analizar cuáles son las consecuencias de la interacción de la onda acústica con los elementos presentes en la cámara presurizada:

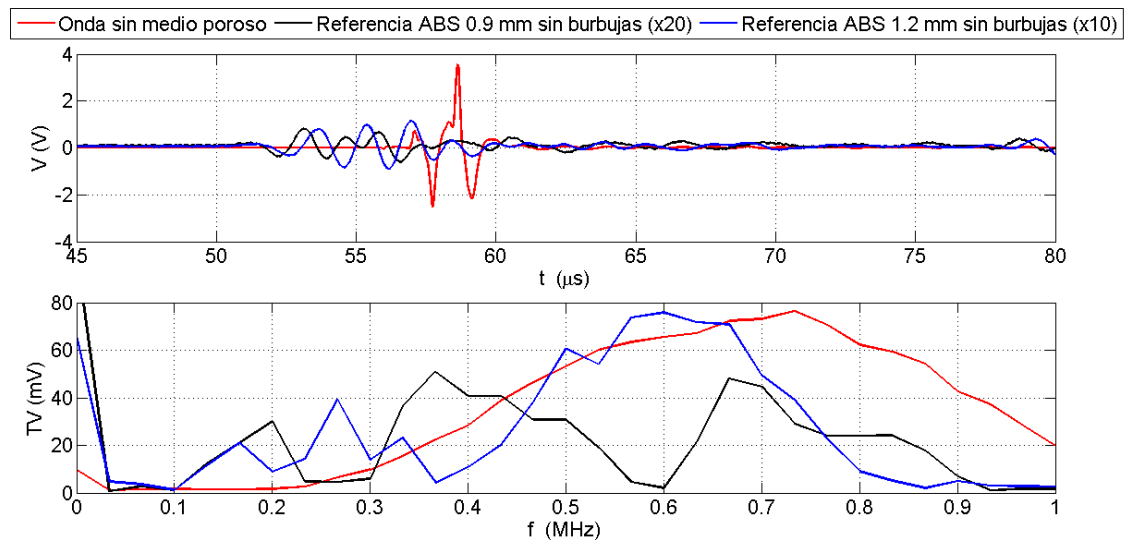


Figura 28: Análisis frecuencial comparativo: sin medio poroso / con medio poroso,

En la parte superior de la imagen se encuentran representadas las señales de las ondas captadas por el hidrófono, mientras que en la gráfica inferior se encuentra representado el espectro de frecuencias de las tres ondas, representado para un ancho de banda de 0 a 1 MHz. Debemos tener en cuenta que para poder realizar correctamente la comparativa hemos escalado la onda medida para la matriz porosa de 0.9 milímetros de tamaño de poro con un factor 20, mientras que la onda medida para el medio poroso de 1.2 milímetros la hemos escalado con un factor 10. En el eje de ordenadas de esa misma gráfica se encuentra representada la transformada de cada onda, que hemos denominado TV, con sus unidades en milivoltios. Como sabemos, cada una de estas ondas es el resultado de la suma de distintas ondas “básicas” denominadas armónicos, cada una con una frecuencia, longitud de onda, amplitud, y fase bien determinadas. Hemos denominado TV a la amplitud, en milivoltios, para cada armónico, con una frecuencia fundamental determinada, que compone cada una de las ondas representadas.

Para la gráfica inferior, como ya hemos señalado anteriormente, se encuentra representado el espectro de frecuencias de cada onda escogida, el cual indica la distribución en frecuencias de la energía transmitida por cada onda. Podemos observar que la frecuencia para la onda inicial de referencia, sin presencia de ningún medio poroso, se encuentra centrada en 0.7 MHz, con un ancho de banda que se encuentra en el intervalo que va de 0.2 MHz hasta más allá de 1 MHz. Comparándola con las otras dos ondas de referencia para cada medio, podemos advertir que las diferencias en escala son considerables, las cuales podemos observar de la misma manera en la gráfica de la parte superior para los valores pico a pico máximos de cada una de las ondas.

Al comparar el espectro en frecuencias para las tres ondas encontramos diferencias apreciables de unas a otras. Teniendo en cuenta que la onda capturada sin presencia del medio poroso sería la onda acústica inicial que emite en todo momento el transductor, y sabiendo que las ondas representadas para los distintos tamaños de poro sin burbujas nucleadas en su interior serían las recibidas por el hidrófono, podemos observar que obtenemos grandes diferencias en ambas gráficas.

Esto encuentra su explicación en la interacción que tiene lugar entre la onda acústica y los distintos medios porosos al avanzar ésta por su interior. Ambos medios porosos, según su configuración física (tamaños de poro), así como el material del que estén fabricados, interactuarán de distinta manera con la onda, absorbiendo gran parte de la energía que propaga, y realizándolo de manera específica para cada frecuencia. Así, vemos que el orden de magnitud de la transformada de Fourier de la onda sin medio poroso es unas 10 veces mayor que la onda que atraviesa el medio poroso de 1.2 milímetros de poro, y unas 20 veces mayor que la onda que atraviesa el medio poroso de 0.9 milímetros de poro. Por lo tanto, podemos deducir que para mayores densidades de poros (tamaño más pequeño de éstos), el material interactuará de manera superior con la onda que lo atraviesa, absorbiendo una cantidad mayor de la energía que propaga, y atenuándola en una medida mayor.

Por otra parte, podemos prestar atención a las frecuencias específicas que se atenúan en presencia de cada medio poroso, comparándolas con el espectro de frecuencia de la onda sin atenuar. Tenemos que tener en cuenta que realizamos la comparativa dentro de los límites del ancho de banda impuesto por la onda sin atenuar, que en este análisis estaría comprendido entre 0.2 y 1 MHz. Teniendo en cuenta que la frecuencia central de la onda sin atenuar es de 0.7 MHz, observamos que, para el caso de un tamaño de poro de 1.2 milímetros, no sólo la atenúa en gran medida, como ya hemos comprobado antes, sino que lo realiza de una manera mayor para frecuencias en torno a 0.4 Mhz, y del intervalo comprendido entre 0.8 y 1 MHz. Sin embargo, al modificar el tamaño de poro, en este caso para 0.9 milímetros, las frecuencias que se atenúan son completamente diferentes, siendo las más afectadas las que se encuentran en el entorno de 0.6 MHz, además de las frecuencias comprendidas en el intervalo de 0.2 a 0.3 MHz.

Este análisis que hemos realizado incluye exclusivamente la atenuación causada por la presencia de los medios porosos en el avance de la onda acústica. Sin embargo, y como hemos podido comprobar en otras comparativas realizadas anteriormente, la presencia de burbujas nucleadas en el interior de los medios porosos también contribuye a la atenuación de la onda acústica. Para comprobar el efecto que producen, observaremos el espectro de frecuencias para varios puntos de un mismo experimento, con el objetivo de determinar cuál es su influencia en la atenuación de la onda:

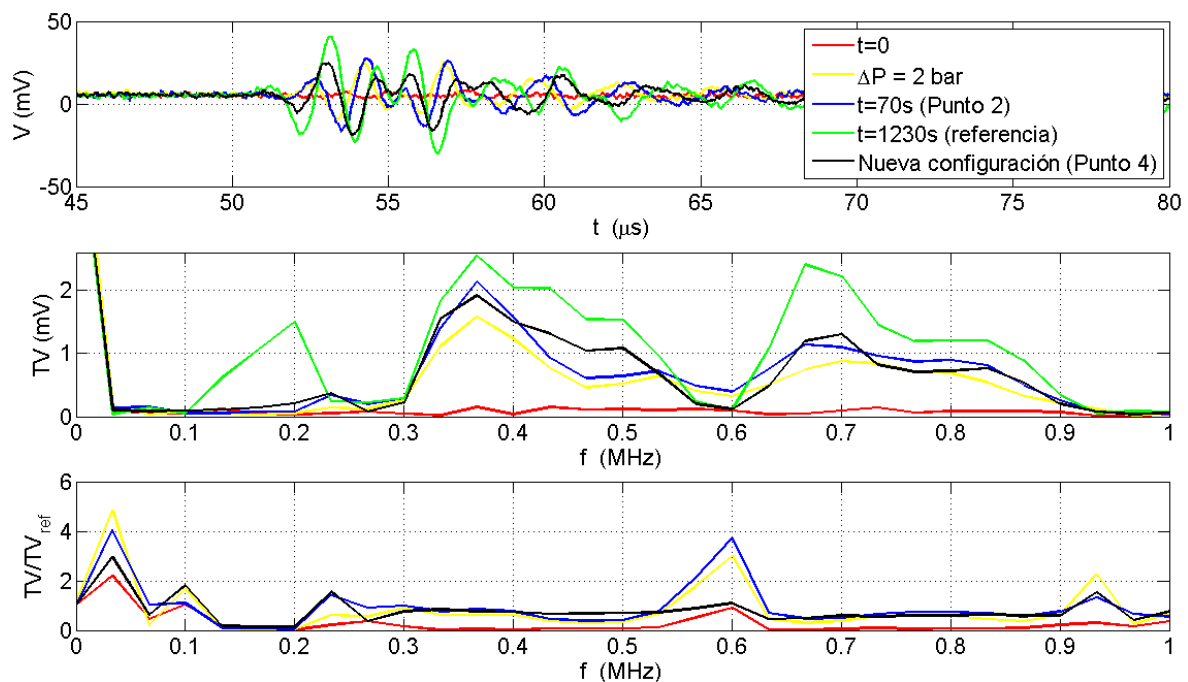


Figura 29: Comparación de distintos instantes, experimento para ABS 0.9 mm. Comparación con referencia (medio poroso sin burbujas).

Los instantes de este experimento se corresponden con el mostrado en gráficas anteriores para un tamaño de poro de 0.9 milímetros (experimento ABS 0.9 mm). En este caso se muestran cinco instantes para la parte del experimento correspondiente a la disolución total: el instante inicial (en color rojo), en el cual se encuentra una gran población de burbujas nucleada en el interior de los poros; el instante posterior al golpe de presión (en color amarillo), que en este caso sería de 2 bares; el instante en el cual alcanzamos la transmisividad de referencia (en color verde), en el cual todas las burbujas se habrían disuelto; y por último, un instante que se encuentra previo al alcance de la transmisividad de referencia (en color azul), y otro instante correspondiente al periodo posterior a la recuperación de la presión inicial en el recinto (en color negro).

Podemos comprobar que, en el instante inicial, la presencia de una población muy numerosa de burbujas tiene una gran influencia en la onda acústica que atraviesa el medio poroso, atenuando prácticamente la totalidad de la energía propagada por esta onda. Al observar la evolución que se produce desde el golpe de presión, en el cual observamos una disminución notable en la atenuación de la onda, hasta el punto de referencia, en el cual las burbujas se han disuelto completamente, podemos comprobar cómo se va incrementando la energía únicamente para algunas frecuencias en concreto. Además, observamos que estos picos que se forman para las frecuencias que menos se consiguen atenuar, se visualizan desde el instante posterior al golpe de presión (en color amarillo). A partir de ese instante, lo que sucede resulta ser que estos picos se van incrementando hasta alcanzar el valor de referencia para la transmisividad del medio poroso sin burbujas en su interior.

Una vez alcanzamos el valor de referencia correspondiente para el medio poroso utilizado, recuperamos la presión inicial dentro de la cámara presurizada, produciéndose así un proceso inverso a la disolución que se ha llevado a cabo anteriormente. El instante representado con la línea negra se corresponde al punto 4 denominado anteriormente en el análisis de la [figura 28](#),

en el cual obtenemos el mismo valor para el voltaje pico a pico que el instante representado por la línea azul, que se sitúa en el tiempo entre la subida de presión en la cámara, y el alcance de la transmisividad de referencia. Este punto, al ser posterior en el tiempo a un proceso de disolución total, la configuración de burbujas, a pesar de tener la misma transmisividad que en el instante $t = 70$ segundos, va a ser completamente diferente. Los efectos que produce una variación en la población de las burbujas también podemos observarlos en el espectro de frecuencias representado: para las líneas azul y negra comprobamos que, a pesar de tener la misma transmisividad (voltaje pico a pico máximo), la variación en la configuración de las burbujas hace que el espectro de frecuencias varíe de una onda con respecto a la otra, lo cual podemos observar en un intervalo de frecuencias entre 0.4 y 0.8 MHz.

Cabe destacar que hay algunos instantes en los cuales la presencia de las burbujas puede provocar una menor atenuación de la onda acústica, lo cual podemos observar tanto para el instante posterior al incremento de presión, como el instante posterior a él ($t = 70$ segundos). En la gráfica de la parte inferior podemos observar cómo, en comparación con la señal de referencia, para esa frecuencia y durante esos instantes la onda se atenúa menos en presencia de burbujas.

6.2 MEDIDA DE LA ATENUACION

Analizando el espectro de frecuencias, hemos comprobado la influencia que tienen la presencia tanto del medio poroso como de las burbujas existentes en su interior en la atenuación de la onda acústica. Sabemos que la atenuación de la onda debida a la presencia del medio poroso siempre va a tener un valor constante a lo largo de todo el experimento. Sin embargo, hemos observado cómo, a medida que el volumen de las burbujas varía a lo largo del experimento, la atenuación de la onda acústica debido a la presencia de las burbujas cambiará: se incrementará a medida que las burbujas aumenten su tamaño (recuperaciones de presión en el recinto y procesos de recuperación), mientras que se reducirá en los procesos en los cuales las burbujas se reduzcan (incrementos de presión en el recinto y procesos de disolución).

Queremos hallar una manera de cuantificar esta atenuación, con el objetivo de relacionar finalmente su valor con la población de burbujas nucleadas en el interior del medio poroso, lo cual representa la fracción de vacío del mismo. Esta fracción de vacío representa la fracción del volumen total del poro que se encuentra ocupada por las burbujas que se encuentren en su interior.

Para cuantificar la medida de la atenuación de una onda, necesitaremos conocer cómo se produce su propagación, y qué características debemos tener en cuenta de esta manera para poder calcularla.

De esta manera, definimos la intensidad acústica como la cantidad de energía por unidad de tiempo que transfiere una onda acústica por unidad de área perpendicular a la dirección de propagación (en el caso de un medio isotrópico el frente de ondas se comporta como una esfera):

$$dI_s = \frac{dP}{r^2 d\Omega}$$

La atenuación cuantifica la pérdida de la energía propagada por la onda acústica a medida que se propaga, teniendo en cuenta que la energía transferida por la onda en su propagación es proporcional tanto a su amplitud elevada al cuadrado como a su frecuencia también elevada al cuadrado:

$$E \propto A^2 \cdot f^2$$

Por lo que, recuperando los resultados obtenidos para el análisis frecuencial y la explicación de los mismos, sabemos que esta energía total propagada por la onda se puede definir distribuyéndola entre las distintas ondas “básicas” (armónicos) que la componen. Así, podremos realizar una medida de la evolución de la atenuación concretando para cada uno de los distintos armónicos (frecuencias) que componen la onda que estamos midiendo a lo largo del tiempo.

Definimos la atenuación de la onda acústica de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{1}{L} \cdot \log\left(\frac{I_{ref}}{I}\right)$$

Siendo:

- L : longitud que recorre la onda, que coincide con la arista del medio poroso.
- I_{ref} : Intensidad acústica de la onda al comienzo de su propagación.
- I : Intensidad acústica final de la onda medida.

En el caso de nuestro experimento, definiremos la atenuación (experimental) que es producida debido a la interacción de la onda con las burbujas de la siguiente manera:

$$\alpha(f) = \frac{1}{L} \cdot \log\left(\frac{|TV_{ref}(f)|^2}{|TV_i(f)|^2}\right)$$

Siendo:

- L : longitud que recorre la onda, que coincide con la arista del medio poroso.
- TV_{ref} : transformada de Fourier de la onda de referencia, siendo ésta la correspondiente a la del medio poroso sin burbujas en su interior; evaluada a una frecuencia concreta.
- TV_i : transformada de Fourier de la onda de la cual queremos medir la atenuación, evaluada a una frecuencia concreta.

Aplicando este método a nuestros resultados, podremos calcular la evolución de la atenuación para las distintas frecuencias que componen el espectro de la onda acústica analizada, para posteriormente analizar esta evolución con el resto de los datos disponibles.

Para el caso del medio poroso con un tamaño de poro de 0.9 milímetros, observaremos previamente el espectro de frecuencias de su señal de referencia para escoger que frecuencias del ancho de banda nos interesa barrer para conocer su variación. Comprobando los resultados obtenidos:

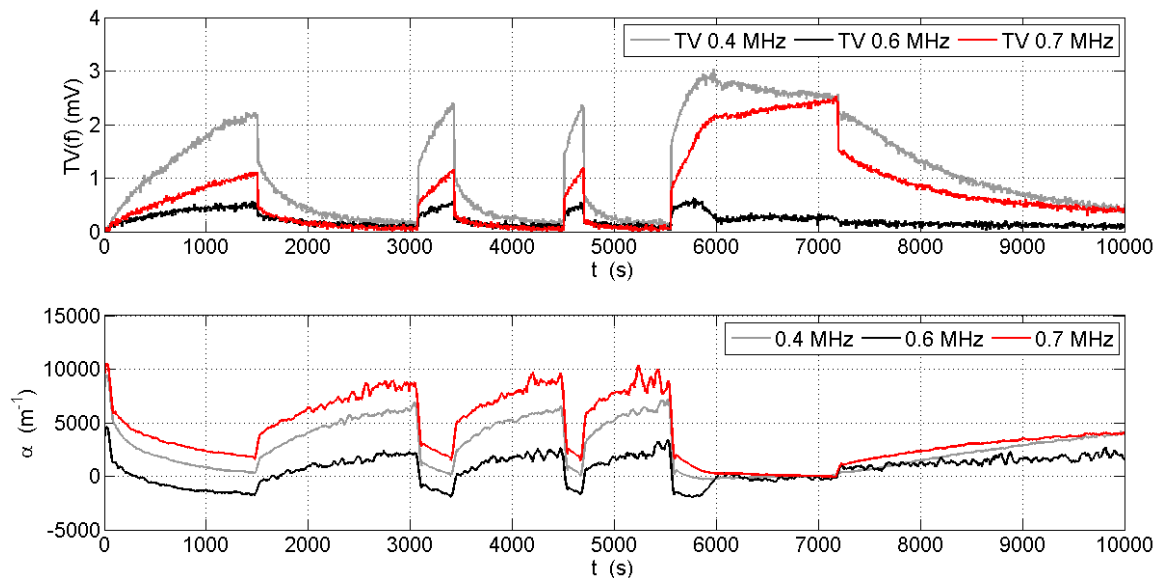


Figura 30: Evolución de la atenuación con respecto al tiempo para varias frecuencias, ABS 0.9 mm (0.4,0.6 y 0.7 MHz)

En la gráfica situada en la parte superior, se muestra la evolución del valor de la transformada de Fourier en función de las tres frecuencias que hemos decidido barrer a lo largo del tiempo. Como podemos observar, la evolución de las transformadas (evaluadas para cada frecuencia) a lo largo del tiempo tiene una tendencia que se asemeja en gran parte a la vista para este mismo experimento en relación a la transmisividad ([figura 29](#)), aumentando el valor de las transformadas evaluadas para cada frecuencia a medida que introducimos los distintos incrementos de presión a lo largo del experimento. Esto, sin embargo, vemos que no se cumple una vez hemos alcanzado la disolución completa, momento a partir del cual cada transformada varía de una manera que no somos capaces de predecir. Observamos que la magnitud de las distintas transformadas a lo largo del tiempo coincide con las magnitudes obtenidas en el análisis espectral realizado anteriormente.

En la gráfica situada en la parte inferior se muestra el cálculo de la atenuación a lo largo del tiempo particularizada para las tres frecuencias que hemos escogido. Esta atenuación, atendiendo a su definición, compara el valor de la transformada para una frecuencia concreta con el valor de la transformada para la onda de referencia (sin burbujas en el interior de los poros) evaluada a esa misma frecuencia. De esta manera, la evolución de las curvas para la atenuación debería ser inversa a la evolución de las curvas para la transmisividad. A medida que se desarrolla un proceso de disolución el volumen de burbujas disminuye conforme avanza el tiempo. De esta manera aumenta la transmisividad al reducirse la interacción entre las burbujas y la onda, razón por la cual cada uno de los valores obtenidos para la atenuación va disminuyendo a medida que se van disolviendo las burbujas, cumpliéndose esto mismo para cada frecuencia escogida.

Al comparar estas variaciones de las transformadas a lo largo del tiempo para cada frecuencia con la transformada para la señal de referencia sin burbujas, estamos comparando únicamente la variación en la atenuación producida por las burbujas nucleadas en el interior del medio poroso. Así, la frecuencia que más variación sufrirá con respecto a su valor en la señal de referencia sin burbujas, a pesar de no ser la señal con mayor valor para su transformada a lo largo del experimento, se corresponde con la frecuencia de 0.7 MHz, la cual podemos observar que es la que sufre una mayor atenuación a lo largo de todo el experimento (representada por la línea roja). La más atenuada a continuación sería la frecuencia correspondiente a 0.4 MHz, y por último, la que menor valor de atenuación tiene a lo largo del experimento se corresponde con la frecuencia de 0.6 MHz.

Comprobando la evolución de otras tres frecuencias para el experimento de un tamaño de poro de 1.2 milímetros, podríamos sacar las siguientes conclusiones:

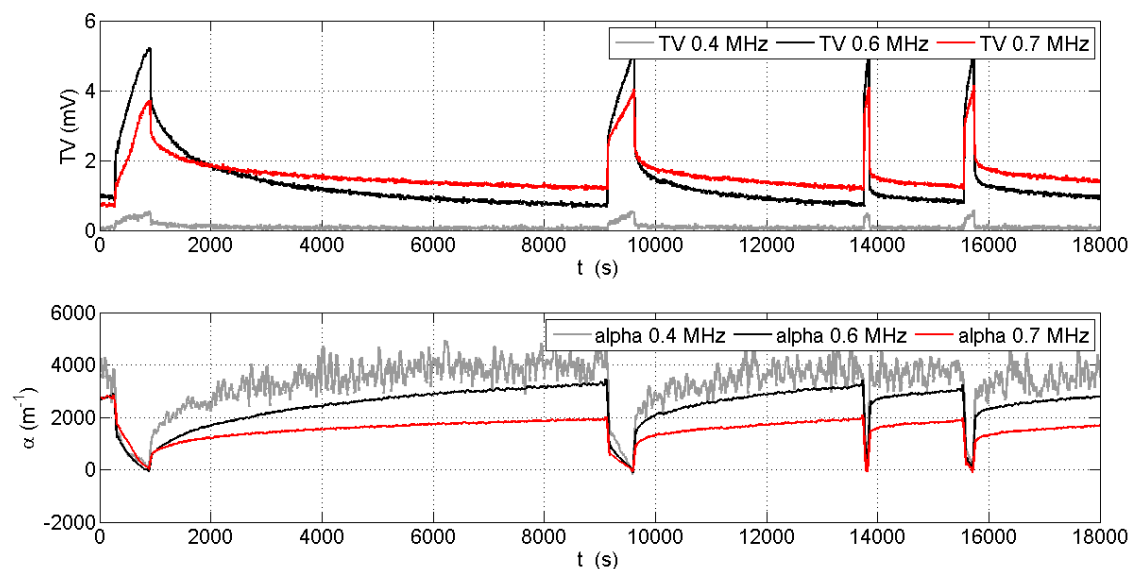


Figura 31: Evolución de la atenuación con respecto al tiempo para varias frecuencias, ABS 1.2 mm (0.4, 0.6 y 0.7 MHz)

En esta imagen podemos comprobar la atenuación para el medio poroso de 1.2 milímetros de tamaño de poro. Al igual que en la figura anterior, podemos observar que la gráfica superior se desarrolla de la misma manera que la de la transmisividad para este mismo elemento. En este caso, la frecuencia más atenuada es la de 0.4 MHz, seguida por la de 0.6 MHz, y en último lugar por la de 0.7 MHz, que es la que menos se atenúa.

- Relación con la fracción de vacío

Una vez observado cómo varía la atenuación que producen las burbujas a lo largo del tiempo para cada frecuencia perteneciente al ancho de banda de la onda, procederemos a relacionarla directamente con la variable que la produce, es decir, las burbujas. Tomaremos como referencia las dimensiones para las burbujas que hemos utilizado en partes anteriores de nuestros análisis para comprobar qué influencia tienen en la variación de la atenuación para cada frecuencia analizada. Para ello, recuperamos la definición de fracción de vacío mencionada anteriormente, que refleja el volumen de cada poro que es ocupado por burbujas que se encuentran en su interior, definida como:

$$\beta = \frac{\text{Volumen ocupado por burbujas}}{\text{Volumen del poro}} = \frac{N_{\text{burbujas}}}{N_{\text{poros}}} \cdot \frac{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_m^3}{L^3}$$

Siendo así:

- N_{burbujas} : número de burbujas contenidas en los poros en los cuales vamos a realizar el conteo.
- N_{poros} : número de poros en los cuales vamos a realizar el conteo de burbujas.
- R_m : radio medio de las burbujas contenidas en los poros.
- L : longitud de la arista del poro

En este caso sería el cálculo de una fracción de vacío promedia para el número de poros considerado. Podemos mostrar el ejemplo para el cálculo de la fracción de vacío de un conjunto de poros cualquiera para el instante inicial del experimento:

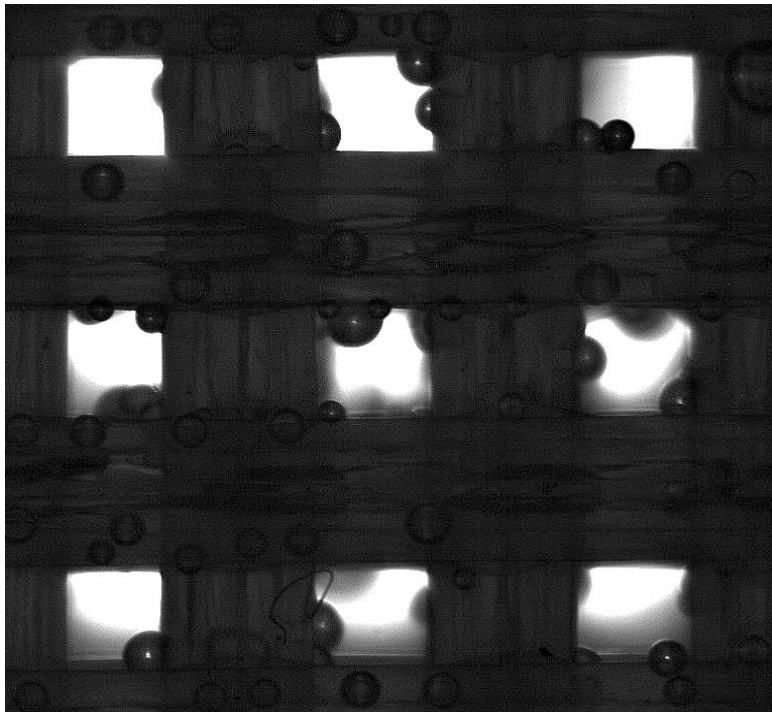


Figura 32: Vista de burbujas nucleadas en el interior de un medio: cálculo de la fracción de vacío

Así, debemos contar tanto el número de poros que se ha escogido para el cálculo, en este caso 9 poros, así como las burbujas que se encuentren nucleadas en el interior de cada poro. Para esto último, necesitamos asegurarnos de tener en cuenta sólo las burbujas que estén enfocadas por la cámara, ya que a lo largo de la longitud del medio poroso podemos encontrarnos multitud de burbujas que, a pesar de estar en la fila correspondiente al poro que estamos considerando, no se encuentran contenidas en el mismo poro. En el caso de esta

imagen contamos 12 burbujas enfocadas en el total de poros mostrados, por lo que la fracción que representa el número de burbujas entre el número de poros tendría un valor por poro de $\frac{12}{9}$ burbujas. El cálculo de esta fracción se realizará tomando en consideración un número mucho mayor de poros, para reflejar realmente lo que sucede en el interior de un medio poroso. Hay que tener en cuenta que se debe calcular para la configuración inicial de burbujas, ya que, una vez iniciado el experimento, debido a los golpes de presión hay burbujas que tienen un tamaño lo suficientemente pequeño como para disolverse instantes después de que se produzcan, cambiando la configuración de esta fracción que estamos calculando.

Además, calcularemos el radio que se encuentra en la expresión de la fracción de vacío como un radio promedio de las burbujas que se encuentran en el interior de los poros, ya que la

distribución de tamaños de la población de burbujas abarca un intervalo muy amplio de radios, los cuales podemos medir. Así, podremos representar la atenuación que se produce según el tamaño medio de las burbujas que se encuentran nucleadas en el interior de los poros, obteniendo los siguientes resultados:

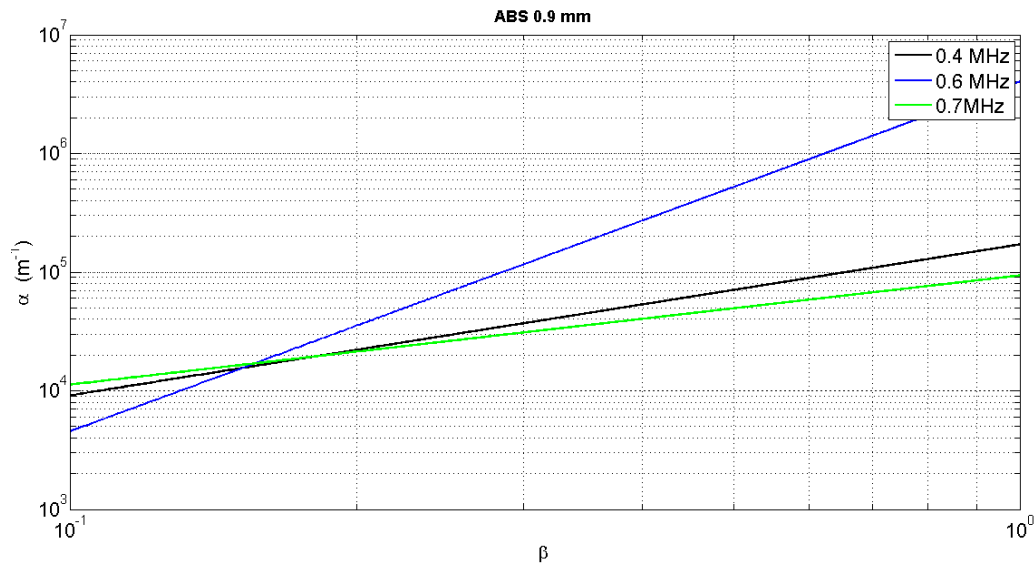


Figura 33: Atenuación en función de la fracción de vacío, ABS 0.9 mm

Resultados que hemos podido obtener al aproximar una nube de puntos correspondientes a las fracciones de vacío recogidas para cada instante, con su correspondiente valor de atenuación. A continuación se muestra cómo se ha obtenido estas curvas, aproximando su evolución a una ecuación del tipo:

$$\alpha \propto \beta^k$$

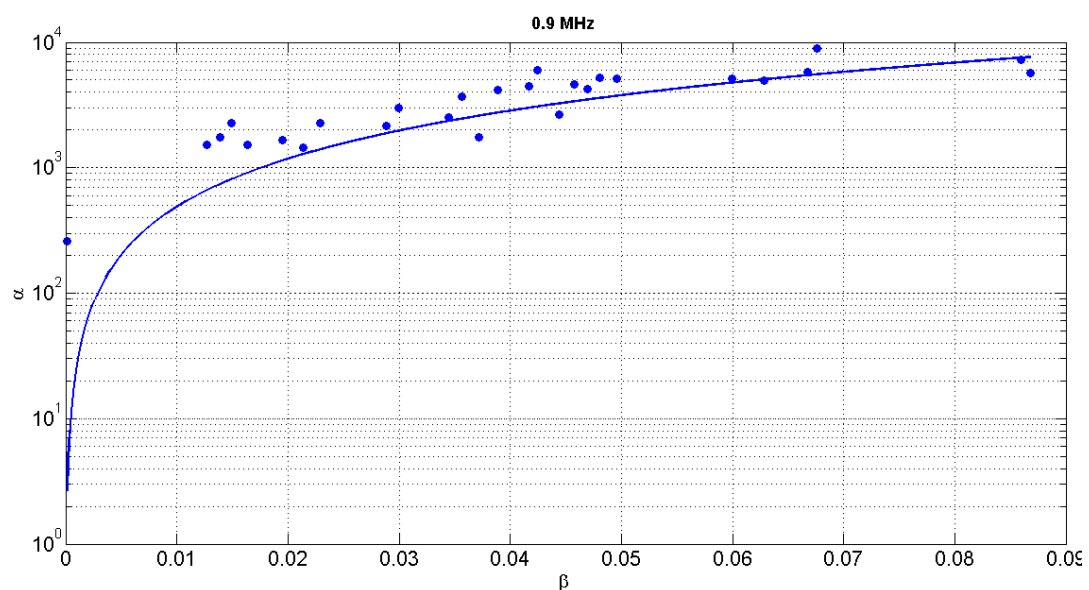


Figura 34: Aproximación a los valores experimentales obtenidos

El motivo por el cual se realiza esta aproximación se comentará en el apartado siguiente.

En cuanto a los resultados obtenidos mediante este análisis, podemos observar cómo para estas tres frecuencias, a medida que va disminuyendo la fracción de vacío, y por lo tanto el volumen de las burbujas en el interior del medio poroso, la atenuación de la onda disminuye (desplazándonos hacia menores valores en el eje de abscisas). Esto es debido a la disminución del volumen de las burbujas, que se traduce en una menor interacción de éstas con la onda acústica, consiguiendo así disipar menos energía a su paso por el conjunto medio poroso – burbujas.

Si observamos la variación de la atenuación en función de la fracción de vacío para el medio poroso de 1.2 milímetros:

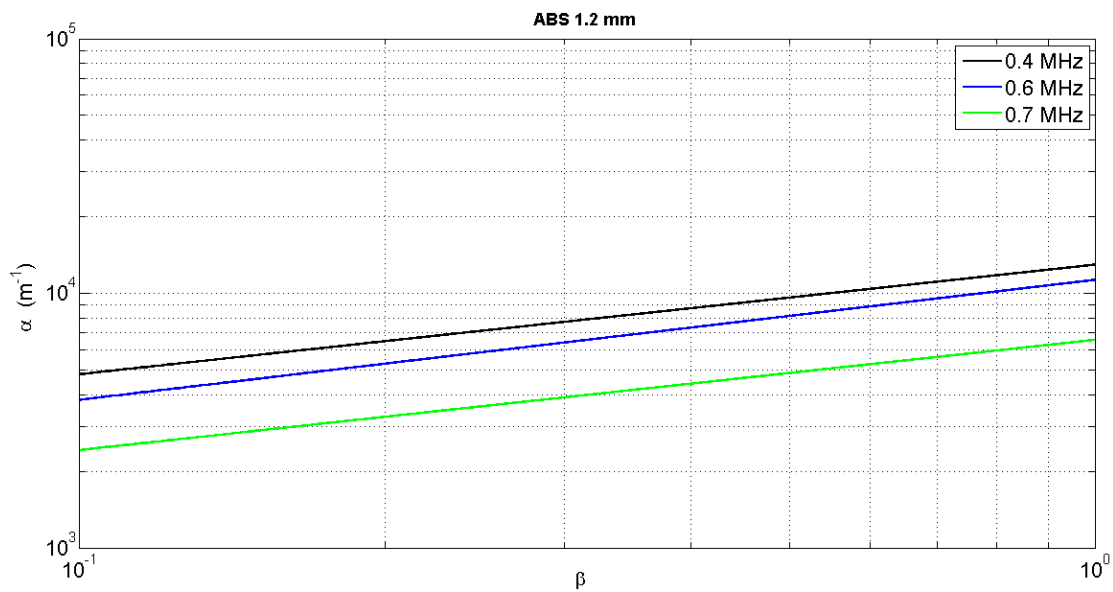


Figura 35: Atenuación en función de la fracción de vacío, ABS 1.2 mm

Podemos comprobar que la variación de la fracción de vacío influye de igual manera en el caso de un tamaño de poro de 1.2 milímetros: al ir reduciéndose la fracción de vacío, el tamaño de las burbujas disminuye de la misma forma, interactuando de una manera menor con la onda acústica que atraviesa el medio, traduciéndose en una menor atenuación final.

Es conveniente la aplicación de un modelo teórico que analice la propagación y dispersión de la onda en un medio en el cual se encuentra presente una población de burbujas, con el objetivo de poder comprender mejor el proceso de dispersión y atenuación que se produce en el interior del medio poroso en presencia de burbujas.

7. MODELO TEORICO

Una vez analizados todos los datos obtenidos mediante la experimentación, buscaremos dar una explicación cualitativa de los fenómenos observados en los distintos ensayos realizados mediante el desarrollo de un modelo teórico, en este caso referente a la propagación de ondas en nubes de burbujas.

Partiremos de la hipótesis que establece que el medio poroso se trata de una matriz rígida que no interactúa acústicamente con las burbujas. Por lo tanto, lo que provocará es una atenuación constante e independiente de las burbujas que se encuentren nucleadas en su interior. Así, podremos obviar la influencia del medio poroso a la hora de observar los datos obtenidos experimentalmente, de tal manera que tanto la evolución de la transmisividad como de la atenuación a lo largo del tiempo serán debidas únicamente a la variación del tamaño de las burbujas durante los procesos de disolución y crecimiento.

El modelo teórico que se expone a continuación se apoya en la teoría de dispersión múltiple aplicada a ondas acústicas. Consideramos cada burbuja como un elemento aislado, que posee un radio R_o inferior a la longitud de onda del sonido irradiado, oscilará radialmente debido a la acción de la presión acústica p_a a su alrededor. De esta manera, y con el objetivo de explicar la dinámica de estas oscilaciones, hacemos uso de la ecuación de Rayleigh – Plesset, la cual explica el comportamiento de una burbuja inmersa en un líquido infinito:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = -\frac{1}{\rho_\infty}(p_a + p_\infty) + \frac{1}{\rho_\infty}\left[p_{g0}\left(\frac{R}{R_o}\right)^{-3\kappa} - \frac{2\sigma}{R} - 4\mu_E\frac{\dot{R}}{R}\right] \quad (1)$$

Siendo p_∞ y ρ_∞ la presión y densidad de equilibrio del líquido, p_{g0} es la presión del aire dentro de la burbuja, σ es la tensión superficial, κ es el índice politrópico del aire (aproximadamente igual a 1) y μ_E el coeficiente de viscosidad-disipación térmica. Debido a estas oscilaciones, la burbuja emite a su vez una onda acústica esférica dispersada (denominada en inglés scattered wave) definida, en régimen lineal de pequeñas oscilaciones como:

$$p_s = \frac{\rho_\infty}{r} \left[R^2(\tau)\ddot{R}(\tau) + 2R(\tau)\dot{R}^2(\tau) \right] \quad (2)$$

En la definición de esta onda dispersada, τ representa la variable temporal y r la coordenada radial con origen en el centro de la burbuja. En la definición de esta onda dispersada hemos retenido el término que se corresponde con la propagación de la onda esférica debida a las pulsaciones de la burbuja, la cual se encuentra inmersa en un medio con cierta compresibilidad, mientras que hemos retirado un segundo término el cual representa la propagación instantánea de la onda cinética debida a las oscilaciones [Leighton (1994)], definido como $-\frac{\rho_\infty}{2} \frac{R^4 \dot{R}^2}{r^4}$.

De esta manera, linealizando las expresiones de las ecuaciones (1) y (2), y llevando a cabo un análisis espectral, podemos escribir presión acústica de la onda radiada de frecuencia ω_o , a cualquier distancia r desde el centro de la burbuja:

$$\hat{p}_s = \frac{R_o P_a}{\left(\frac{\omega_n}{\omega_o}\right)^2 - 1 - i\Gamma} \frac{e^{ikr}}{r} \quad (3)$$

Ecuación en la cual: $k = \omega_o/c_\infty$ es el número de onda, Γ es el coeficiente de amortiguamiento (que equivale aproximadamente a 0.01), y ω_n es la frecuencia natural de la burbuja. Las frecuencias naturales o resonantes se definen como las frecuencias a las que tiende a vibrar un elemento resonador cuando éste es excitado. Así, definiremos la frecuencia propia de la burbuja mediante la ecuación indicada por Minnaert:

$$\nu = \frac{1}{2\pi r} \sqrt{\frac{3\kappa p_0}{\rho}} \quad (4)$$

A partir de la expresión para la onda dispersada, definimos finalmente la función de dispersión de la burbuja (scattering function), haciendo $p_s = P_a f_s \exp(ikr)/r$, obteniendo finalmente:

$$f_s = \frac{R_o P_a}{\left(\frac{\omega_n}{\omega_o}\right)^2 - 1 - i\Gamma} \quad (5)$$

Expresión que nos proporcionará información sobre la intensidad de la onda dispersada por la burbuja, cuantificando sus propiedades como elemento dispersor y disipador del sonido.

Entonces, analizaremos el fenómeno de dispersión acústica que se produce cuando una excitación externa p_a incide sobre una nube compuesta por N burbujas:

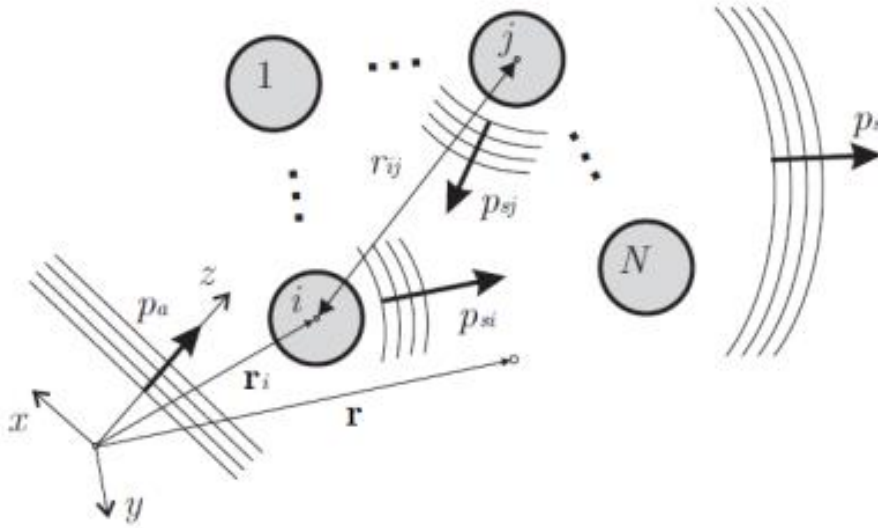


Figura 36: Esquema del proceso de dispersión múltiple que se produce en el seno de la nube de burbujas.

Podemos observar como las oscilaciones producidas por una burbuja influyen en el comportamiento de sus vecinas a través de la emisión de ondas esféricas. Debido a que la onda dispersada por una burbuja p_{si} es susceptible de ser dispersada nuevamente por sus vecinas, podemos decir que en el seno de la nube de burbujas se producirá un fenómeno conocido como dispersión múltiple (multiple scattering). De esta manera, la onda total que

dispersará la población completa de burbujas será, por linealidad, la suma de las ondas dispersadas por cada burbuja de manera individual:

$$p_s = \sum_{i=1}^N p_{si}$$

Según los análisis clásicos de la teoría de dispersión múltiple realizados por Foldy (1945), Lax (1951) o Twersky (1962), podemos establecer que la onda dispersada por una burbuja i será consecuencia de dos fenómenos: por una parte de la acción de la onda externa, la cual hemos denominado p_a , así como de la onda que dispersa a su vez la burbuja j , siendo $j = 1, \dots, N$ con $j \neq i$ (como podemos observar en la imagen superior). De esta manera, si definimos la onda externa p_a como una onda plana de frecuencia ω_0 propagándose en la dirección del eje z , uniendo las contribuciones de todas las ondas podemos escribir:

$$\hat{p}_{si}(r) = f_{si} e^{-ikz_i} (P_a e^{-ikz_i} + \xi_j) \left(\frac{e^{-ik|r-r_i|}}{|r-r_i|} \right) \quad (6)$$

Expresión en la cual se ha hecho uso del resultado anterior correspondiente a la presión emitida por una burbuja aislada. En esta expresión podemos distinguir la aportación debida a la excitación de las ondas dispersadas por el resto de burbujas recurriendo al siguiente término:

$$\xi_i = \sum_{j \neq i}^N f_{sj} (P_a e^{-ikz_i} + \xi_j) \frac{e^{-ikr_{ij}}}{r_{ij}} \quad (7)$$

El cual representa la presión acústica total dispersada en los alrededores de la burbuja i . Además, esta expresión constituye un sistema lineal de N ecuaciones para el cómputo de las presiones ξ_i [Feuillade (1995), Skaropoulos (2003), Hahn (2007)]. Cabe mencionar que esta ecuación, este sistema se escribiría de la siguiente manera:

$$\xi = \Lambda(\Pi + \xi)$$

Siendo:

$$\xi = [\xi_i, \dots, \xi_N] \quad y \quad \Pi = P_a[\exp(ikz_1), \dots, \exp(ikz_N)]$$

Los vectores de presión dispersada total e incidente, respectivamente. La matriz de acoplamiento acústico Λ quedará definida entonces de la siguiente manera:

$$\Lambda_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } i = j \\ f_{sj} \frac{e^{ikr_{ij}}}{r_{ij}} & \text{si } i \neq j \end{cases}$$

Reescribiendo de manera correcta la expresión matricial para el sistema de ecuaciones como $(I - \Lambda)\xi = \Lambda\Pi$, siendo I la matriz identidad, y aplicando algún algoritmo de inversión estándar, podemos obtener numéricamente el valor de la presión dispersada en los alrededores de cada burbuja resolviendo la ecuación (6) de forma individualizada para cada una de ellas.

Por último, y como habíamos hecho mención anteriormente, la onda total que se propaga a través de la nube de burbujas se construye como la superposición entre la onda total dispersada y la onda externa incidente, escribiendo finalmente:

$$p(r) = P_a e^{ikz} + \sum_{i=1}^N f_{si} (P_a e^{-ikz_i} + \xi_j) \left(\frac{e^{-ik|r-r_i|}}{|r-r_i|} \right) \quad (8)$$

Así, seremos capaces de calcular la presión acústica en cada punto, tanto interior como exterior a la nube, además de ser capaces de determinar el valor característico de la atenuación de la onda acústica debido a la interacción con la nube de burbujas, siendo función tanto de la frecuencia de excitación como de las propiedades de la población de burbujas. Para realizarlo, utilizaremos, tomando el módulo al cuadrado de la presión total, determinaremos el valor de la intensidad acústica a través de la nube:

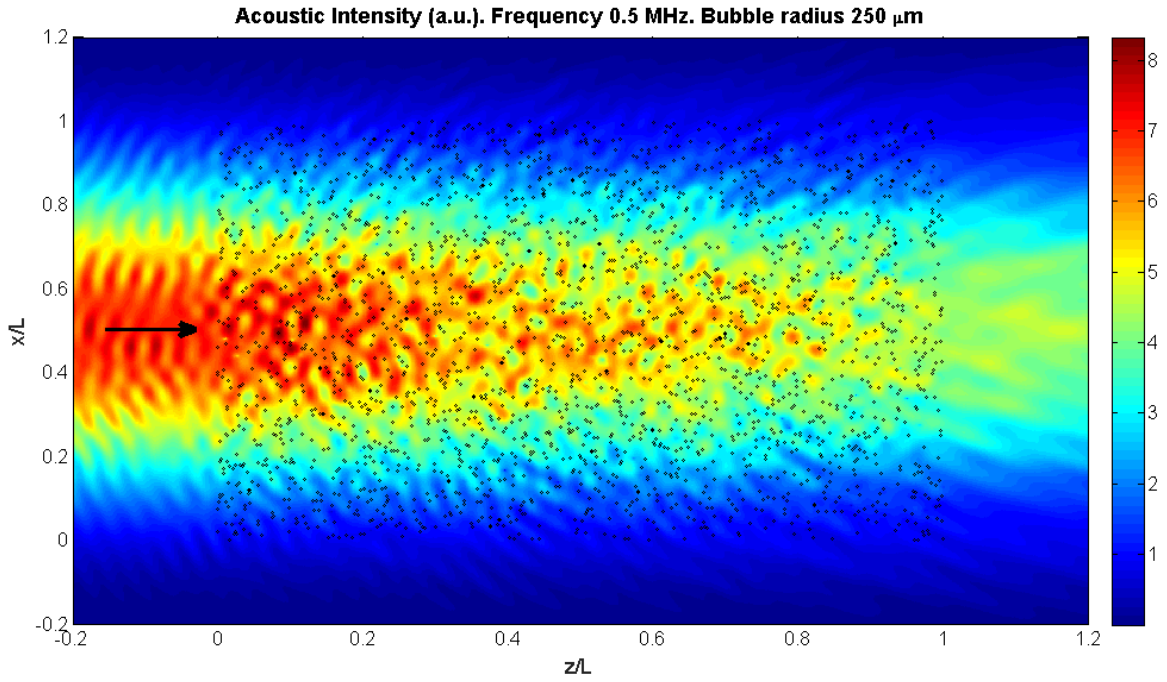


Figura 37: Distribución de la intensidad acústica en presencia de burbujas

La coordenada z indicada en la leyenda del eje de abscisas representa la coordenada longitudinal de propagación de la onda acústica. Para este modelo, se ha tomado como excitación externa un haz monocromático emitido por un transductor plano vibrando a 0.5 MHz. Podemos observar que la intensidad acústica va decayendo a medida que se adentra en la nube de burbujas debido a las propiedades disipativas y dispersoras de las burbujas pertenecientes a la nube.

Podríamos establecer una analogía con el fenómeno de atenuación óptica, descrito mediante la ley de Lambert – Beer, la cual relaciona la intensidad de luz entrante y saliente en un medio después de haberse producido absorción por parte de dicho medio:

$$\frac{I_1}{I_0} = e^{-\alpha l} \quad (9)$$

Siendo l la longitud atravesada por la luz en el medio.

Mediante el modelo definido de esta manera, podemos variar los tamaños de las burbujas en la nube para poder comprobar qué efectos produce en la intensidad acústica de la onda final.

Así, en la siguiente figura podemos observar cómo afecta el tamaño medio de las burbujas a la pérdida de intensidad acústica a lo largo de la nube:

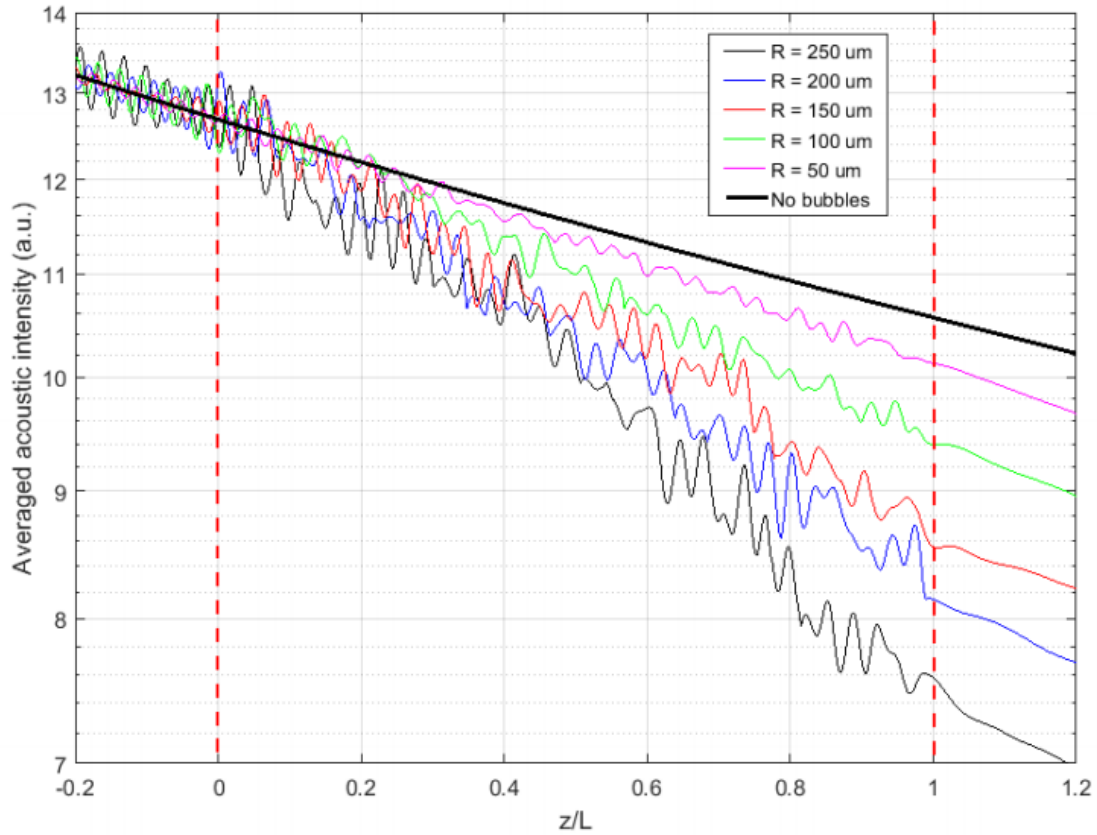


Figura 38: Perfiles de intensidad para distinto radio medio de la población de burbujas

Podemos observar cómo, a medida que el tamaño de burbuja disminuye, los perfiles de intensidad presentan un decaimiento cada vez menor, y comprobando esta variación con el valor de referencia para una onda que no encuentra ninguna burbuja en su propagación. Tomando como referencia este valor de intensidad, podemos definir el coeficiente de atenuación de burbujas aplicando la Ley de Lambert – Beer mencionada anteriormente:

$$I = I_0 \exp(-\alpha z) \quad (10)$$

A partir de esta expresión, tomando como zona de medida de referencia un punto ligeramente alejado de la parte trasera de la nube de burbujas, podremos definir la atenuación como:

$$\alpha = \frac{1}{L} \left(\frac{I_{ref}}{I_L} \right) = \frac{1}{L} \left(\frac{|p_{ref}|^2}{|p_L|^2} \right) \quad (11)$$

La cual es función tanto de la frecuencia de la onda, como del tamaño medio de las burbujas de la población, que se puede relacionar con la fracción de vacío de la misma. Observando los resultados experimentales para distintos valores del radio medio, evaluados para distintas frecuencias obtenemos los siguientes resultados:

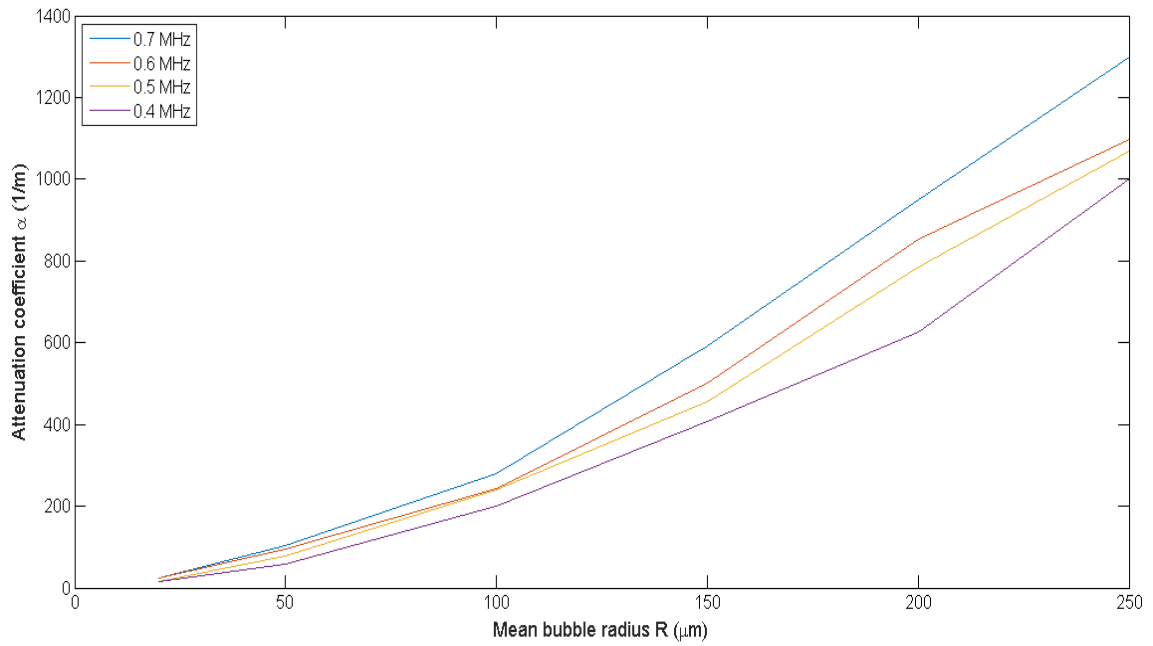


Figura 39: Coeficiente de atenuación según el radio medio de la población de burbujas

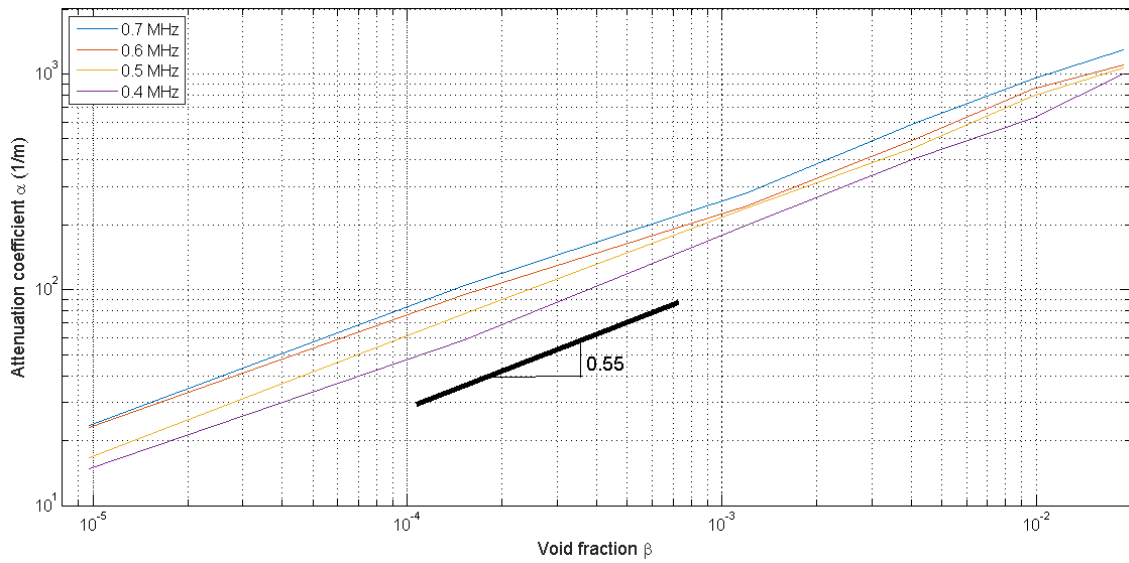


Figura 40: Coeficiente de atenuación en función de la fracción de vacío

De esta manera podemos observar la clara dependencia que la atenuación acústica tiene con las características de tamaño y fracción de vacío de la población de burbujas. Así, ha sido posible encontrar una ley de escala aproximada, válida como podemos observar para todo el rango de frecuencias de nuestro interés, estableciendo de esta manera que:

$$\alpha \propto \beta^{0.55}$$